

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



UN ENFOQUE INTEGRADO MULTICRITERIO PARA  
LA PLANIFICACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE  
PASO Y LAS TABLAS DE TIEMPO DE UNA  
EMPRESA DE TRANSPORTE URBANO

POR

PAULINA ALEJANDRA ÁVILA TORRES

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

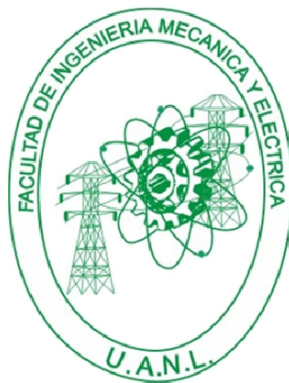
SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

JUNIO 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



UN ENFOQUE INTEGRADO MULTICRITERIO PARA  
LA PLANIFICACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE  
PASO Y LAS TABLAS DE TIEMPO DE UNA  
EMPRESA DE TRANSPORTE URBANO

POR

PAULINA ALEJANDRA ÁVILA TORRES

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

JUNIO 2012

# Universidad Autónoma de Nuevo León

## Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

### División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Un enfoque integrado multicriterio para la planificación de las frecuencias de paso y las tablas de tiempo de una empresa de transporte urbano», realizada por la alumna Paulina Alejandra Ávila Torres, con número de matrícula 1541904, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas.

El Comité de Tesis

---

Dr. Fernando López Irarragorri

Director

---

Dra. Yasmín A. Ríos Solís

Revisor

---

Dr. Francisco Román Angel Bello Acosta

Revisor

Vo. Bo.

---

Dr. Moisés Hinojosa Rivera

División de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, junio 2012

*A mi familia.*

*Especialmente a mi mamá Mary Torres*

*y a mi papá Román Ávila (†).*

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>XIII</b>
<b>Resumen</b>	<b>XIV</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto . . . . .	2
1.2. Antecedentes . . . . .	3
1.3. Descripción del problema científico . . . . .	4
1.4. Justificación . . . . .	4
1.5. Objetivo general . . . . .	5
1.6. Objetivos específicos . . . . .	5
1.7. Novedad científica . . . . .	5
1.8. Tareas científicas . . . . .	6
1.9. Estructura de la tesis . . . . .	7
1.10. Conclusiones del capítulo 1 . . . . .	8
<b>2. Marco teórico</b>	<b>9</b>
2.1. Programación entera . . . . .	9

2.2. Optimización multiobjetivo . . . . .	11
2.3. Optimización con metaheurísticas . . . . .	14
2.3.1. Metaheurísticas multiobjetivo . . . . .	17
2.4. Teoría de la decisión multicriterio . . . . .	22
2.4.1. Promethee . . . . .	26
2.5. Teoría del transporte urbano . . . . .	29
2.6. Estado del arte . . . . .	32
2.6.1. Análisis crítico. . . . .	36
2.7. Conclusiones del capítulo 2 . . . . .	52
<b>3. Formulación de FTT</b>	<b>54</b>
3.1. Planteamiento del problema . . . . .	54
3.2. Supuestos del problema . . . . .	58
3.3. Modelo lineal entero mixto . . . . .	59
3.3.1. El modelo . . . . .	60
3.4. Conclusiones del capítulo 3 . . . . .	68
<b>4. Metodología para FTT</b>	<b>69</b>
4.1. Metodología de apoyo a la decisión . . . . .	69
4.2. Implementación de MOTS . . . . .	70
4.3. Implementación de SSPMO . . . . .	73
4.4. Implementación de Promethee . . . . .	74
4.5. Conclusiones del capítulo 4 . . . . .	75

<b>5. Resultados</b>	<b>76</b>
5.1. Planeación del experimento . . . . .	76
5.2. Prueba de conflicto de criterios . . . . .	79
5.3. Resultados de los métodos metaheurísticos . . . . .	80
5.3.1. Instancias pequeñas . . . . .	82
5.3.2. Instancias medianas . . . . .	84
5.3.3. Instancias grandes . . . . .	86
5.4. Prueba de sobreclasificación . . . . .	90
5.5. Conclusiones del capítulo . . . . .	92
<b>6. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>93</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	93
6.2. Recomendaciones . . . . .	94
6.3. Trabajo futuro . . . . .	95
<b>A. Apéndice: Resultados MOTS</b>	<b>97</b>
<b>B. Apéndice: Resultados SSPMO</b>	<b>100</b>
<b>C. Apéndice: Trabajos previos</b>	<b>103</b>
<b>D. Apéndice: Soluciones prueba de criterios</b>	<b>108</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>113</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

1.1. Tareas científicas para resolver FTT. . . . .	7
2.1. Proceso de toma de decisiones [33]. . . . .	23
2.2. El rol del apoyo a la decisión en la toma de decisiones [4]. . . . .	24
2.3. Funciones de agregación [6]. . . . .	27
2.4. Proceso de planeación del transporte urbano [10]. . . . .	31
2.5. Diagrama de bloque para determinar la frecuencia de paso [11]. . . . .	44
2.6. Tabla de tiempos con cabecera iguales [11]. . . . .	46
2.7. Tabla de tiempos con cargas promedio [11]. . . . .	47
3.1. Proceso de planeación de frecuencia mínima y tabla de tiempos (integrado). . . . .	55
4.1. Cantidad de soluciones candidatas. . . . .	71
4.2. Nuevas de soluciones candidatas. . . . .	72
5.1. Gráfica comparativa para instancia pequeña. . . . .	83
5.2. Distancia al punto ideal para instancia pequeña. . . . .	84
5.3. Gráfica comparativa para instancia mediana. . . . .	85



---

5.4. Distancia al punto ideal para instancia mediana. . . . .	86
5.5. Gráfica comparativa para instancia grande. . . . .	87
5.6. Distancia al punto ideal para instancia grande. . . . .	88
5.7. Tiempos de ejecución. . . . .	89
6.1. Propuesta de trabajo futuro. . . . .	96

# ÍNDICE DE TABLAS

---

2.1. Artículos más citados. . . . .	34
2.2. Autores más citados. . . . .	34
2.3. Clasificación de artículos por subtema. . . . .	35
2.4. Los cinco artículos más citados. . . . .	35
4.1. Proceso de toma de decisión. . . . .	70
4.2. Arreglo que indica los tiempos de salida en MOTS. . . . .	71
4.3. Ejemplo de movimientos en el arreglo. . . . .	71
4.4. Arreglo de tiempos de salida. . . . .	73
4.5. Funciones para cada objetivo. . . . .	74
5.1. Características de las instancias. . . . .	77
5.2. Cantidad de instancias generadas para cada tipo. . . . .	77
5.3. Longitudes y tiempos de tramos. . . . .	78
5.4. Soluciones prueba de conflicto de criterios. . . . .	80
5.5. Datos de instancia pequeña poco densa. . . . .	81
5.6. Datos de instancia mediana densa. . . . .	81

---

5.7. Datos de instancia grande medianamente densa. . . . .	82
5.8. Porcentajes comparativos para instancia pequeña. . . . .	83
5.9. Punto ideal para instancia pequeña. . . . .	83
5.10. Porcentajes comparativos para la instancia mediana. . . . .	85
5.11. Punto ideal para instancia mediana. . . . .	85
5.12. Porcentajes comparativos para la instancia grande. . . . .	86
5.13. Punto ideal para instancia grande. . . . .	87
5.14. Tiempos de ejecución en segundos. . . . .	88
5.15. Resumen de resultados. . . . .	89
5.16. Valores de Promethee. . . . .	90
5.17. Resultados prueba de sobreclasificación. . . . .	92
A.1. Soluciones de instancia pequeña poco densa con MOTS que forman la frontera de Pareto. . . . .	97
A.2. Soluciones de instancia mediana densa con MOTS que forman la fron- tera de Pareto. . . . .	98
A.3. Soluciones de instancia grande medianamente densa con MOTS que forman la frontera de Pareto. . . . .	99
B.1. Soluciones de instancia pequeña poco densa con SSPMO que forman la frontera de Pareto. . . . .	100
B.2. Soluciones de instancia mediana densa con SSPMO que forman la frontera de Pareto. . . . .	101
B.3. Soluciones de instancia grande medianamente densa con SSPMO que forman la frontera de Pareto. . . . .	102

---

C.1. Trabajos previos. . . . .	103
D.1. Solución obtenida para costo. . . . .	109
D.2. Solución obtenida para sincronizaciones. . . . .	110
D.3. Solución obtenida para tiempo de transbordo. . . . .	111
D.4. Solución obtenida para penalidad. . . . .	112

# AGRADECIMIENTOS

---

A Dios por haberme permitido terminar mis estudios de maestría.

A mi familia por el apoyo brindado a lo largo de estos años.

A mi mamá por su apoyo incondicional.

A mis maestros y de manera muy especial a mi director Dr. Fernando López Irraragorri por los conocimientos aportados y sus consejos en el trabajo de tesis.

Al Dr. Rafael Caballero y su equipo de trabajo por las aportaciones hechas a este trabajo de tesis.

A la Dra. Yasmín Ríos Solís y al Dr. Francisco Ángel Bello Acosta, por formar parte de mi comité de tesis.

A la FIME y CONACyT por el apoyo económico otorgado que me permitió realizar mis estudios de posgrado.

# RESUMEN

---

Paulina Alejandra Ávila Torres.

Candidato para el grado de Maestro en Ingeniería  
con especialidad en Ingeniería de Sistemas.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio:

## UN ENFOQUE INTEGRADO MULTICRITERIO PARA LA PLANIFICACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE PASO Y LAS TABLAS DE TIEMPO DE UNA EMPRESA DE TRANSPORTE URBANO

Número de páginas: 119

**OBJETIVOS:** Desarrollar una metodología de apoyo a la decisión al problema integrado del establecimiento de frecuencias de paso mínimo y la construcción de la tabla de tiempos en una empresa de transporte urbano, considerando objetivos de diversos actores sociales (empresa, pasajeros, gobierno, etc...)

**CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES:** Formulación multiobjetivo del problema del establecimiento de la frecuencia de paso mínimo y la tabla de tiempos, considerando la transición entre periodos con demanda promedio diferente, distintos criterios

del sistema de transporte público e implementación de un método de solución que resuelve instancias de tamaño razonable.

Firma del director: \_\_\_\_\_

Dr. Fernando López Irarragorri

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

---

En este capítulo se presenta el diseño de la investigación, que comprende la contextualización del problema científico sujeto a estudio. Un enfoque integrado multicriterio para la planificación de las frecuencias de paso y las tablas de tiempo de una empresa de transporte urbano.

A continuación se presenta la estructura de este capítulo. En la Sección 1.1 se analiza el proceso de planeación del transporte urbano, luego se describen brevemente trabajos previos. En la Sección 1.2 se evidencia que existen pocos trabajos que han abordado el problema propuesto en este trabajo. A continuación en la Sección 1.3 se describe de manera general el problema que se aborda en esta investigación. En la Sección 1.4 se presenta la justificación de este problema. En las Secciones 1.5 y 1.6 se describen: el objetivo general y los objetivos específicos que rigen esta investigación.

Luego se presenta la novedad científica en la Sección 1.7 y las tareas científicas de la investigación en la Sección 1.8. La sección de tareas científicas hace mención a la metodología empleada por la autora para llevar a cabo esta investigación, describiendo detalladamente cada una de las tareas.

En la Sección 1.9 se describe el contenido de cada uno de los capítulos que conforman esta tesis y finalmente en la Sección 1.10 se presentan las conclusiones del capítulo.



## 1.1 CONTEXTO

Según Ceder [11], el proceso de planeación de transporte urbano comunmente incluye cuatro actividades básicas, usualmente ejecutadas en secuencia: (1) Diseño de la red, (2) Confección de la tablas de tiempos, (3) Asignación de vehículos y (4) Asignación de operadores.

Estas actividades según Desaulniers & Hickman [16] están divididas en tres subsistemas: estratégico, táctico y operacional. El objetivo del subsistema estratégico (diseño de la red) es maximizar la calidad del servicio bajo ciertas restricciones de cartera, mientras que el subsistema de la planeación táctica concierne a las decisiones relacionadas al servicio ofrecido al público (las frecuencias de paso de las rutas y las tablas de tiempo). Estos subsistemas también se enfocan al nivel de servicio, finalmente el subsistema de planeación operacional (asignación de vehículos y asignación de operadores) se ocupa de como la operación debe ser hecha para brindar el servicio propuesto a un menor costo.

Según Desaulniers & Hickman [16] el problema del establecimiento de frecuencias mínimas de paso consiste en seleccionar las frecuencias que maximicen el servicio de los pasajeros, esto incluye restricciones de flota de vehículos, capacidad y políticas para un mínimo de frecuencias deseadas. El problema del establecimiento de frecuencias mínimas de paso es fundamental para los programadores de la planeación del transporte urbano en cuya solución deben considerarse al menos dos objetivos en conflicto [23]: por una parte, las empresas desean minimizar los costos de operación y por la otra, los pasajeros desean un menor tiempo de viaje.

La confección de tablas de tiempos consiste en la planificación de salidas de autobuses a partir de las frecuencias de paso y otros parámetros. Un objetivo típico consiste en maximizar las sincronizaciones de autobuses que refleja las necesidades de transportación de la comunidad. La tabla de tiempos es la base del éxito para las dos siguientes actividades dentro del proceso de planeación de transporte urbano

como se señala en Borndorfer et al.[5].

Generalmente, la planificación de una empresa de transporte urbano se realiza manualmente. Los programadores de la operación intentan crear horarios de salida en una tabla de tiempos mientras cumplen con la frecuencia requerida y la sincronización de nodos o tramos preestablecidos [12].

La construcción de las tablas de tiempos (itinerarios) según Molinero & Sánchez [40] es determinante para brindar un nivel deseado de servicio en diferentes periodos del día. En general, las tablas de tiempo son importantes para la empresa porque ayudan a mantener bajo control salarios y otros costos de la operación. Además, las tablas de tiempo son la base de una operación controlada y ordenada.

## 1.2 ANTECEDENTES

Existen pocos trabajos que han integrado dos o más etapas del proceso de transporte como diseño de red y tablas de tiempos o diseño de red y frecuencia mínima. Sin embargo, en la literatura no se ha encontrado ningún trabajo que integre las etapas de frecuencia mínima de paso y tablas de tiempo como se propone en esta tesis.

En la literatura revisada se han encontrado investigaciones con múltiples objetivos, siendo los más típicos: maximización de sincronizaciones [12, 28, 18], minimización de costos [32, 15], minimización de tiempos (de espera, de viaje, de transferencia) [13, 48], maximización del nivel de servicio [48], maximización del cumplimiento de la demanda [19]. Son muy pocos los trabajos encontrados en la literatura que incluyan la transición entre periodos.

En general, los aspectos que se consideran del problema en este trabajo de investigación al cual llamaremos FTT (integración de etapas, modelos multiobjetivo, transición entre periodos) han sido abordados en otras investigaciones pero de manera individual, no se ha encontrado en la literatura ningún trabajo que integre

todos estos aspectos.

### 1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA CIENTÍFICO

En este trabajo se investiga el problema de establecer de forma integrada la frecuencia mínima de paso y la tabla de tiempos de las rutas de los autobuses de una empresa de transporte público, considerando:

- Diferentes criterios que brinden beneficios a todos los actores sociales involucrados en el proceso del transporte urbano.
- La transición de periodos adyacentes con diferencias notables en la demanda. Por ejemplo, la transición de un periodo que representa una hora pico a un periodo valle.

### 1.4 JUSTIFICACIÓN

El establecimiento de frecuencias mínimas de paso y confección de tablas de tiempo son los dos problemas a los que los planeadores de la operación se enfrentan día a día. Típicamente, los programadores de la operación suelen modificar en base a su experiencia la tabla de tiempos para ajustarla a la realidad. Esto repercute en las etapas de asignación de vehículos y asignación de operadores, ya que se modifica la planeación hecha, y cualquier cambio efectuado en las frecuencias mínimas y su tabla de tiempos puede implicar que se asigne un mayor número de vehículos y operadores. Lo que ocasiona incremento en los costos de operación y disminución del nivel de servicio de los pasajeros.

El transporte público en México está a cargo de empresas privadas. Muchas de ellas no cuentan con algún sistema computarizado y eficiente que determine la frecuencia de paso, tabla de tiempos, horario de vehículos, etc; por lo general, la

planeación realizada es de manera manual lo que trae los inconvenientes descritos arriba.

## 1.5 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una metodología de apoyo a la decisión al problema integrado del establecimiento de frecuencias de paso mínimo y la construcción de la tabla de tiempos en una empresa de transporte urbano, considerando objetivos de diversos actores sociales (empresa, pasajeros, gobierno, etc...) y la transición entre periodos con demandas dispares.

## 1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Crear el modelo general que integre la frecuencia de paso mínimo y la tabla de tiempos, tomando en consideración la transición entre periodos con diferencias notables en la demanda y aplicar diferentes criterios para dar un mayor beneficio a los actores sociales involucrados en el proceso de planeación del transporte urbano.
2. Implementar y comparar algoritmos o métodos de solución.
3. Mostrar la aplicabilidad de la metodología en ejemplos concretos generados aleatoriamente.

## 1.7 NOVEDAD CIENTÍFICA

- Metodología de apoyo a la decisión (inteligencia, diseño y elección) para el problema integrado del establecimiento de la frecuencia de paso mínima y la tabla de tiempos de autobuses.
- Modelo matemático entero mixto, considerando:

- Integración de frecuencia de paso mínima y tabla de tiempos.
  - Múltiples periodos.
  - La transición entre periodos con demanda promedio diferente.
  - Criterios de todos los actores sociales del sistema de transporte público.
- Implementación de un método de solución que resuelve instancias de tamaño razonable.

## 1.8 TAREAS CIENTÍFICAS

En la Figura 1.1 se presentan las tareas científicas que se llevan a cabo en la presente investigación. La primera tarea ejecutada es la investigación de la literatura, haciendo una búsqueda intensiva de los artículos cuyo tema está relacionado con el tema de investigación de este trabajo. Posteriormente, de esa lista de artículos se seleccionan los veinte artículos mas citados, luego se clasifican los veinte artículos por subtema y por fecha de publicación, teniendo clásicos (antes del 2000), contemporáneos (del 2000 al 2008) y recientes (2009 a la fecha). Después, del total de artículos seleccionamos los veinte autores más citados y realizamos una clasificación similar a la elaborada con los artículos.

Para cada uno de los artículos seleccionados se realiza una ficha bibliográfica que incluye título, autores, revista, año de publicación, resumen, innovación científica, conclusiones y una crítica personal.

Posteriormente, se establecen los supuestos del problema bajo los cuales es válido. Posteriormente, se procede a desarrollar un modelo matemático que satisfaga las condiciones necesarias para resolverlo.

Después, se procede a desarrollar e implementar métodos metaheurísticos que resuelven instancias en menor tiempo. A continuación, se selecciona un método MCDM (Multicriteria Decision Making).

En seguida, se realizan experimentos numéricos y finalmente, la escritura de la tesis.

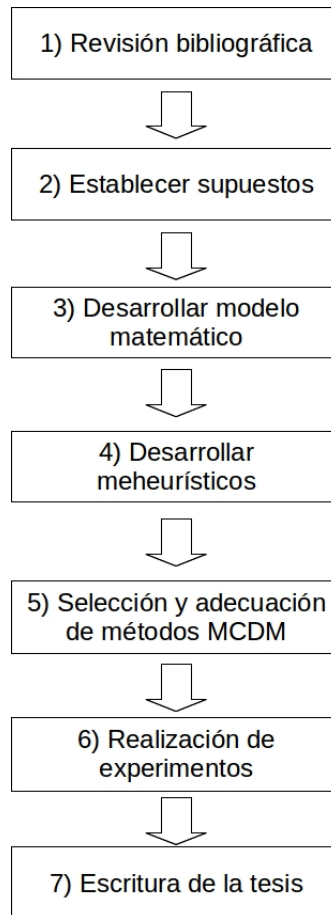


Figura 1.1: Tareas científicas para resolver FTT.

## 1.9 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El presente documento está organizado de la siguiente manera: en el Capítulo 2, después de esta introducción, se presenta el marco teórico abarcando los temas que están relacionados con el problema y la perspectiva desde la cual se aborda el problema. En ese capítulo se exponen temas como programación entera, optimización con metaheurísticas, optimización multiobjetivo, la teoría de planeación del transporte público, entre otros. También, se presenta el estado del arte y se exponen

semejanzas y diferencias con problemas similares.

En el Capítulo 3 se plantea detalladamente el problema, se presenta el modelo matemático desarrollado y los supuestos considerados. En el Capítulo 4 se describe la metodología general que se sigue para resolver FTT, se presentan las adaptaciones que se hacen a los metaheurísticos con los cuales se resuelve FTT (estructuras, vecindades, movimientos, etc...).

En el Capítulo 5 se presentan los resultados de la prueba de conflictos de criterios y una prueba de sobreclasificación. También se analizan y discuten los resultados obtenidos con MOTS y SSPMO. Finalmente, en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones y recomendaciones.

## 1.10 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 1

Hasta la fecha no existen trabajos que modelen de forma simultánea las etapas de frecuencia mínima de paso y tablas de tiempo multiperiodo y multiobjetivo, con transición entre periodos con demandas diferentes.

La solución del problema tratado en esta tesis es importante para México pues generalmente el mismo es resuelto de forma manual de dos rutas en dos rutas esto implica un mayor esfuerzo y mayor costo, puede generar aglomeramiento entre rutas que cuentan con tramos en común.

## CAPÍTULO 2

# MARCO TEÓRICO

---

En este capítulo se hace una revisión a algunos temas necesarios para una mejor comprensión del problema que se aborda en esta tesis, al cual le llamaremos FTT. En la Sección 2.1 se muestran conceptos básicos relacionados a la programación entera. En la Sección 2.2 se exponen conceptos de optimización multiobjetivo. Posteriormente, en la Sección 2.3, se aborda el tema de optimización con metaheurísticas, se explica qué es una metaheurística y cuáles son las más populares, también se explica brevemente las metaheurísticas multiobjetivo. Dentro de esta misma sección se explican los metaheurísticos que se utilizan para resolver FTT.

Después en la Sección 2.4 se presentan conceptos básicos de la teoría de la decisión multicriterio. Posteriormente, en la Sección 2.5 se expone la teoría del transporte urbano. En seguida, en la Sección 2.6 se hace un análisis crítico sobre el estado del arte. Finalmente, en la Sección 2.7 se exponen las conclusiones del capítulo.

## 2.1 PROGRAMACIÓN ENTERA

Existen problemas lineales donde es aceptable que las variables de decisión tomen valores fraccionales, por ejemplo se puede producir 3.5 litros de vino o decir que se tiene en promedio una producción de 58.5 automóviles. Sin embargo, existen muchos problemas donde las soluciones fraccionales no son realistas [52]. Tal es el caso de programación de tablas de tiempo, donde se busca encontrar un horario de autobuses o trenes y que los tiempos sean lo suficientemente pequeños para que



el tiempo de espera no sea excesivo pero sea suficientemente grande para permitir el transbordo. Otro ejemplo es en telecomunicaciones, un problema típico en esta área es la instalación de nueva capacidad para satisfacer una demanda prevista de voz/datos, el problema es minimizar el costo tomando en cuenta la posibilidad de falla de una línea o un centro. Otro problema es la planeación de una programación de generación de electricidad por hora o por semana para decidir qué generadores producirán electricidad y a qué nivel, por mencionar algunos [52].

Suponga que tiene un problema representado por un modelo lineal

$$\text{máx}\{cx : Ax \leq b, x \geq 0\}$$

donde  $A$  es una matriz de  $m \times n$ ,  $c$  es un vector renglón  $n$ -dimensional,  $b$  es un vector columna  $m$ -dimensional de variables. Ahora se agregan restricciones tal que ciertas variables tomen valores enteros. Este tipo de problemas son llamados problemas de programación entera [52] (IP por sus siglas en inglés).

*Tipos de formulación de programación que existen*

Existen dentro de la programación entera diferentes formulaciones [52]:

- La programación entera (IP por sus siglas en inglés) es cuando todas las variables son enteras.

$$\text{máx } cx$$

$$Ax \leq b$$

$$x \geq 0 \text{ enteras}$$

- En la programación entera binaria (BIP por sus siglas en inglés) todas las variables son restringidas a tomar valores de 0-1.

$$\text{máx } cx$$

$$\begin{aligned} Ax &\leq b \\ x &\in \{0,1\}^n \end{aligned}$$

- La programación entera mixta (MIP, por sus siglas en inglés) se aplica cuando algunas variables, no todas, son enteras. El modelo que se presenta en el Capítulo 3 corresponde a este tipo de formulación.

$$\begin{aligned} \text{máx } cx &+ hy \\ Ax &+ Gy \leq b \\ x &\geq 0, \quad y \geq 0 \text{ entera} \end{aligned}$$

## 2.2 OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO

La mayoría de los problemas de optimización del mundo real son de naturaleza multiobjetivo. La optimización multiobjetivo o multicriterio (MOP) tiene la particular característica de que no existe una solución única que optimice simultáneamente todos los criterios de calidad (objetivos), sino un conjunto de soluciones válidas donde todas y cada una de ellas deben ser consideradas. Esta característica es consecuencia del conflicto de los atributos y da lugar al concepto de soluciones no dominadas, que se abordará en rigor más adelante.

Un problema de optimización multiobjetivo (MOP) es definido en [20] como: El problema de encontrar un vector de variables de decisión que satisfaga las restricciones y optimice una función vectorial cuyos elementos representen las funciones objetivo. Estas funciones forman una descripción matemática de criterios de desempeño que están usualmente en conflicto entre sí.

- Variable de decisión: es un conjunto de  $n$  variables cuyos valores dan una solución (puede o no ser válida) a un problema de optimización. Agrupadas en un vector  $\bar{X}$  y cada variable representada por  $x_j$ ; donde  $j=1,2,\dots,n$ .

- Restricciones: delimitan el problema y validan las soluciones. Por lo tanto, se puede decir que las restricciones dibujan el contorno de la región donde se encuentra el conjunto factible del problema. Las restricciones son funciones de las variables de decisión y son expresadas con ecuaciones de igualdad o desigualdad.
- Función objetivo: Las funciones objetivo forman el criterio de evaluación para saber que tan buena es una solución; al igual que las restricciones, son funciones de las variables de decisión. En la optimización multiobjetivo existen dos o más funciones objetivos  $(f_1(\bar{X}), f_2(\bar{X}), \dots, f_k(\bar{X}))$  en cada problema. El vector de funciones objetivo puede representarse:

$$\bar{f}(\bar{X}) = [f_1(\bar{X}), f_2(\bar{X}), \dots, f_k(\bar{X})]^T.$$

En resumen, un problema de optimización multiobjetivo es un conjunto de  $n$  variables de decisión,  $k$  funciones objetivo,  $m$  restricciones de desigualdad y  $p$  de igualdad. En estos problemas el objetivo de la optimización es encontrar el vector de decisión  $\bar{X}$  para:

Minimizar o Maximizar

$$\bar{f}(\bar{X}) = [f_1(\bar{X}), f_2(\bar{X}), \dots, f_k(\bar{X})]^T.$$

cumpliendo con:

$$\bar{g}(\bar{x}) \leq 0; \bar{g} = [g_1, g_2, \dots, g_m],$$

$$\bar{h}(\bar{x}) = 0; \bar{h} = [h_1, h_2, \dots, h_p].$$

Generalmente, no existe la solución óptima ideal (aquella óptima en todos los objetivos simultáneamente) [20]. Buscamos entonces el mejor compromiso. En este afán, es necesario tener claros los conceptos conjunto factible, dominancia de Pareto, óptimo de Pareto y frente de Pareto.

- Conjunto factible: El conjunto factible  $S$  está definido como el conjunto de

vectores de decisión  $\bar{X}$  que satisfaga las restricciones de desigualdad  $\bar{g}_i(\bar{x})$  y las restricciones de igualdad  $\bar{h}_i(\bar{x})$ .

- Dominancia de Pareto: Para dos vectores de decisión  $\bar{x}^*, \bar{y}^* \in X$  se dice que  $x^*$  domina a  $y^*$ , si y solo si:

- La solución  $\bar{x}^*$  no es peor que  $\bar{y}^*$  en ninguno de sus objetivos. En caso de minimización la fórmula es:

$$f_j(\bar{x}^*) < f_j(\bar{y}^*), \forall j = 1, 2, \dots, m.$$

- La solución  $\bar{x}^*$  es estrictamente mejor que la solución  $\bar{y}^*$  en al menos un objetivo:

$$f_j(\bar{x}^*) \leq f_j(\bar{y}^*) \text{ para al menos un } j \in 1, 2, \dots, m$$

y lo denotaremos como  $f_j(x^*) \leq f_j(y^*)$ .

- Óptimo de Pareto: Una solución factible  $\bar{x} \in X$  es llamada eficiente u óptima de Pareto, si no existe otra  $x \in X$  talque  $f(x) \leq f(\bar{x})$ . El concepto de óptimo de Pareto tiene gran importancia en optimización multiobjetivo.

- Frontera de Pareto: Para un MOP dado y un conjunto óptimo de Pareto  $P^*$ , la frontera de Pareto (FP) se define como:

$$FP^* = \{(f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)) | x \in P^*\}.$$

Es decir, la frontera de Pareto está compuesto por los valores en el espacio de objetivos del conjunto óptimo de Pareto.

Existen diferencias fundamentales en los principios de funcionamiento de los algoritmos para optimización mono y multiobjetivo. Así, las técnicas utilizadas para resolver MOPs no se restringen normalmente a encontrar una solución única, sino un conjunto de soluciones de compromiso entre los múltiples objetivos en conflicto, ya que no suele existir una solución que optimice simultáneamente todos los objetivos. Se pueden distinguir, por tanto, dos etapas cuando se aborda este tipo de problemas: por un lado, la optimización de varias funciones objetivo involucradas y, por otro, el

proceso de toma de decisiones sobre qué solución de compromiso es la más adecuada. Atendiendo a cómo manejan estas dos etapas, las técnicas para resolver MOPs se pueden clasificar en [35]:

- Sin modelación de preferencias.
  - Método del criterio global.
  - Método multiobjetivo de los paquetes próximos.
- A priori.
  - Método de la suma ponderada.
  - Método de restricciones.
- A posteriori.
  - Método de la función valor.
  - Método lexicográfico.
  - Programación de metas.
  - Programación borrosa.

Una forma clásica de resolver los problemas de optimización multiobjetivo, es la de agregar todos los objetivos en una función de utilidad, y resolver el problema como un problema de un solo objetivo, o a través de un método interactivo [47]. La teoría de optimización multiobjetivo se aborda debido a que el modelo presentado en el Capítulo 3 es multiobjetivo.

## 2.3 OPTIMIZACIÓN CON METAHEURÍSTICAS

En los años setenta surgió una nueva clase de algoritmos aproximados, cuya idea básica era combinar diferentes métodos heurísticos a un nivel más alto para conseguir una exploración del espacio de búsqueda de forma eficiente y efectiva.

Estas técnicas se han denominado metaheurísticas. Este término fue introducido por primera vez por Glover [24].

Osman & Laporte [44] dicen que una metaheurística es un proceso de generación iterativo que guía a una heurística subordinada combinando inteligentemente diferentes conceptos para explorar y explotar el espacio de búsquedas, estrategias de aprendizaje son usadas para construir información y encontrar eficientemente soluciones cercanas al óptimo.

Existen dos conceptos de gran importancia para las metaheurísticas *diversificación* e *intensificación* [3]. El término diversificación se refiere a la evaluación de soluciones en regiones distantes del espacio de búsqueda (de acuerdo a una distancia previamente definida entre soluciones); también se conoce como exploración del espacio de búsqueda. El término intensificación, por otro lado, se refiere a la evaluación de soluciones en regiones acotadas y pequeñas con respecto al espacio de búsqueda centradas en el vecindario de soluciones concretas (explotación del espacio de búsqueda) [35].

La razón por la que el uso de las metaheurísticas ha recibido más y más atención en los últimos 30 años es que existen problemas para los que no se puede obtener una solución óptima en un tiempo aceptable según las condiciones específicas del problema que se intenta resolver. Con las metaheurísticas se sacrifica la garantía de encontrar una solución óptima por obtener una “buena solución” según el tomador de decisiones en un tiempo razonable [3]. Una característica de las metaheurísticas es su flexibilidad pues los cambios en la estructura del problema pueden ser fácilmente incorporados [50, 49].

### *Las metaheurísticas más populares*

El interés en las heurísticas ha ido en aumento y algunas de las populares son recocido simulado, algoritmos genéticos, búsqueda tabú, entre otros [50]. A continuación, hablaremos de las características de algunas de ellas, para finalmente explicar las metaheurísticas que se utilizan en FTT.

Recocido simulado [54] es una heurística adaptativa general que pertenece a la clase de los algoritmos no deterministas. Su ventaja principal es la habilidad para evitar ser atrapado en mínimos locales. Trata de imitar el proceso de termodinámica del recocido. Este algoritmo utiliza el procedimiento de metrópolis el cual simula el proceso del recocido a una temperatura  $T$  dada. La idea básica del recocido simulado es usar búsquedas aleatorias en términos de cadena de Markov, la cual no solo acepta cambios que mejoren el valor de la función objetivo, sino que también acepta cambios que no son ideales si cumplen con una probabilidad  $p$ .

Los algoritmos genéticos [54] emulan el proceso natural de evolución para ejecutar una búsqueda en el espacio de soluciones. Pertenecen a los algoritmos no deterministas. Los algoritmos genéticos operan en una población (o conjunto) de individuos (o soluciones) codificados como cadenas. La representación de una solución al problema de optimización en forma de cadena codificada se llama cromosoma, los símbolos que forman al cromosoma se llaman genes y los diferentes valores que puede tomar el gen se llaman alelos. Los algoritmos genéticos requieren un constructor de población inicial y utilizan operadores genéticos básicos como el cruzamiento (aplica para un par de cromosomas) y la mutación (aplica a un solo cromosoma).

Búsqueda tabú es un procedimiento metaheurístico cuya característica distintiva es el uso de memoria adaptativa y de estrategias especiales de resolución de problemas. La filosofía de la búsqueda tabú es derivar y explotar una colección de estrategias inteligentes para la solución de problemas, basadas en procedimientos implícitos y explícitos de aprendizaje. La memoria adaptativa de búsqueda tabú no solo explota la resolución del problema, sino que también exige la creación de estructuras para hacer posible tal explotación. Estas estructuras de memoria funcionan mediante referencia a cuatro dimensiones principales: reciente, frecuencia, calidad e influencia [25].

Un algoritmo básico de búsqueda tabú usa memoria a corto plazo en la forma de las llamadas *listas tabú* para escapar de un óptimo local o para evitar ciclos. En los algoritmos estándar de búsqueda tabú las listas tabú son implementadas en la forma

de *el primero que entra el primero que sale*. Las listas tabú generalmente almacenan características de soluciones visitadas recientemente. Al inicio del algoritmo la lista tabú es inicializada como vacía.

Para realizar un movimiento, el algoritmo primero determina aquellas soluciones del vecindario de la solución actual que contengan características que son encontradas en la lista tabú. Se dice que esas soluciones violan la condición tabú y son excluidas del vecindario resultando en un conjunto restringido de vecinos. Sin embargo, almacenar solo características de soluciones permite la posibilidad de que soluciones de alta calidad sin visitar sean excluidas del conjunto de vecinos. Para superar este problema, se define un criterio de aspiración que permite incluir una solución en el conjunto de vecinos restringidos aún cuando viole la condición tabú.

En cada iteración la mejor solución del conjunto de vecinos restringidos es seleccionada como la nueva solución actual. Las características correspondientes a esta solución son agregadas a la lista tabú, en caso de que la lista tabú hubiera alcanzado su máxima longitud, las características de la solución que ingresó con mayor anterioridad son eliminadas. Este algoritmo se detiene cuando llega a una condición de expiración. En general, una lista tabú previene de regresar a soluciones recientemente visitadas [3]. En esta investigación, se emplean dos métodos basados en búsqueda tabú [26], [39]. Los cuales se explicarán más adelante en este mismo capítulo.

### 2.3.1 METAHEURÍSTICAS MULTIOBJETIVO

Las adaptaciones de las técnicas metaheurísticas para resolver los problemas de optimización multiobjetivo ha crecido últimamente de forma significativa [50]. Jones et al [29] (en el año 2002) dice que el 70 % de los artículos que emplean las metaheurísticas en problemas de optimización multiobjetivo, utilizan los algoritmos genéticos como metaheurística principal, el 24 % utilizan el recocido simulado y el 6 % la búsqueda tabú. A continuación se describen los dos metaheurísticos utilizados



en FTT:

### Búsqueda tabú multiobjetivo: MOTS

Es un algoritmo basado en una búsqueda tabú multiobjetivo [26] que se utiliza para resolver el problema abordado en este trabajo, las adaptaciones requeridas para resolver FTT se mencionan en el Capítulo 4. El método búsqueda tabú para optimización multiobjetivo (MOTS) es una adaptación del búsqueda tabú. Trabaja con un conjunto de soluciones que a través de manipulación de pesos son optimizados hacia la frontera de los no dominados mientras que al mismo tiempo busca dispersarse a lo largo de la frontera. Este metaheurístico emplea el método de la suma ponderada. A continuación, se muestra el pseudocódigo de este método.

1. Para cada solución  $x_i$  en  $X$  generar solución factible  $x_i$  y hacer  $TL_i = \{ \}$
2.  $ND = \phi$  ,  $count = 1$  y  $\pi^k = \frac{1}{n}$  para todos los objetivos  $k$
3. Repetir
4. Para cada solución  $x_i$  en  $X$  hacer
5.  $\lambda = 0$
6. Para cada solución  $j$  en  $X$  donde  $f(x_j)$  es no dominada por  $f(x_i)$  y  $f(x_i) \neq f(x_j)$  hacer
7.  $w = g(d(f(x_i), f(x_j), \phi))$
8. Para todos los objetivos  $k$  donde  $f^k(x_i) > f^k(x_j)$  hacer  $\pi^k = \lambda^k + \pi \cdot w$
9. Fin
10. Si  $\lambda = 0$  entonces  $\lambda =$  vector aleatorio de  $\Lambda$
11. Normalizar( $\lambda$ )
12. Encontrar la solución  $y_i$  que maximiza  $\lambda \cdot f(x_i)$  donde  $y_i \in N(x_i)$  y  $A(x_i, y_i) \notin TL_i$

13. Si  $TL_i$  está a su máxima capacidad entonces se elimina el elemento más viejo de  $TL_i$
14. Agregar  $A(y_i, x_i)$  a  $TL_i$  como el elemento más reciente
15.  $x_i = y_i$
16. Si  $f(y_i)$  es no dominado por ningún punto en ND entonces implementar el punto  $f(y_i)$  a ND y actualizar  $\pi$
17. Si criterio de cambio entonces seleccionar solución aleatoria de  $X$  igual a otra solución aleatoriamente seleccionada de  $X$
18. Contador ++
19. Fin
20. Hasta criterio de parada.

En la línea 1 se genera una solución factible en el conjunto de soluciones ( $X$ ) y la lista tabú ( $TL$ ) se declara vacía, en la línea 2 el conjunto de puntos no dominados ( $ND$ ) se vacía, un contador de iteraciones se restablece y el rango de equalización ( $\pi$ ) se establece a un vector único, entonces se inicia el ciclo que permite que cada solución haga un movimiento a una solución vecina hasta un criterio de parada.

En las líneas 5-11 el vector de pesos ( $\lambda$ ) es determinado. La cercanía es medida por una función de distancia ( $d$ ) basada en algunas métricas en el espacio de las funciones objetivo y utilizando pesos en el rango de equalización.

En las líneas 12-15 se reemplaza la solución factible actual por la mejor solución vecina factible ( $N$ ). El mejor vecino es determinado por el producto escalar entre el vector de pesos y el vector de funciones objetivo.

En la línea 16 el nuevo punto es agregado al conjunto de los no dominados ( $ND$ ), el rango de equalización ( $\pi$ ) se actualiza. En la línea 17 reemplazamos una solución seleccionada aleatoriamente por otra solución seleccionada aleatoriamente

si un cierto criterio es alcanzado. Finalmente en la línea 18 el contador de iteraciones es incrementado y continuamos con la siguiente iteración.

### **SSPMO: Un procedimiento basado en búsqueda tabú y búsqueda dispersa para la optimización multiobjetivo**

Una búsqueda dispersa consiste en la construcción y mantenimiento del conjunto de referencia de soluciones mediante la aplicación de cinco métodos:

1. Generación diversificada.
2. Generación de subconjunto.
3. Combinación.
4. Mejora.
5. Actualización del conjunto de referencia.

Este metaheurístico consiste en una búsqueda tabú y una búsqueda dispersa híbrida que incluye dos fases:

- Generación de un conjunto de puntos eficientes mediante varias búsquedas tabú.
- Combinación de soluciones y la actualización de la frontera eficiente mediante una búsqueda dispersa.

En lo que sigue se describe de forma general cada fase del método SSPMO, para mayor detalle en su descripción o funcionamiento se recomienda revisar [39]:

#### *Fase inicial*

El procedimiento inicia ligando  $p+1$  búsquedas tabú: La primera búsqueda tabú inicia desde un punto arbitrario e intenta encontrar la solución óptima al problema con un solo objetivo  $f_1(x)$ . Supongamos, que  $x_1$  es el último punto visitado

en esta búsqueda. Después, una búsqueda tabú se aplica nuevamente para encontrar la mejor solución con  $f_2(x)$  usando  $x_1$  como el punto inicial. Este proceso se repite hasta que el problema se ha resuelto para todos los  $p$  objetivos. Aquí se resuelve nuevamente el problema para la  $f_1(x)$  iniciando de  $x_p$  para terminar el ciclo alrededor del conjunto eficiente. Posteriormente, se lanzan varias búsquedas tabú usando un método de criterio global. En este paso se busca minimizar una función que mide la distancia hacia el punto ideal  $f^{max}$  (aquel para el cual cada criterio alcanza su máximo valor). En general un punto que minimize la distancia a  $f^{max}$  es un punto eficiente.

*Segunda Fase: búsqueda dispersa*

El principal mecanismo de la segunda fase consiste en la combinación de soluciones que son consideradas como eficientes y por lo tanto pertenecen al conjunto eficiente. Las soluciones que son combinadas son seleccionadas del conjunto de referencia (*Refset*) el cual es un subconjunto del conjunto eficiente. El *Refset* consiste en  $b$  soluciones ( $b > p$ ) e inicialmente se construye de la siguiente manera:

1. Seleccionar la mejor solución en el conjunto eficiente ( $E$ ) para cada función objetivo y se agregan al *Refset*.
2. Seleccionar  $b-p$  soluciones de  $E \setminus Refset$  que maximice la distancia entre ellas y aquellas soluciones ya existentes en *Refset*. Debido a que las soluciones son seleccionadas aleatoriamente, la medida de la distancia es actualizada después de cada iteración.

Se mantiene una lista de soluciones que han sido seleccionadas como puntos de referencia para prevenir su selección en futuras iteraciones. Así cada solución que es agregada al *Refset* es también agregada al *TabuRefset*.

Un método de combinación lineal es usado para enlazar soluciones de referencia. Todos los pares de soluciones en *Refset* son combinados y cada combinación crea cuatro nuevas soluciones. Cada una de estas soluciones es sometida a un método

de mejora, aquí se utiliza un método tabú para mejorar las soluciones, el mismo tabú que se usa en la fase inicial. Las soluciones generadas en la fase de mejora son revisadas para saber si es posible agregarlas al conjunto eficiente ( $E$ ).

Una vez que todos los pares de soluciones en *Refset* son combinados y las nuevas soluciones son mejoradas, el procedimiento actualiza el conjunto de referencia para la siguiente iteración de la búsqueda de dispersa. El primer paso en el proceso de actualización es elegir las mejores soluciones de acuerdo a cada función objetivo por separado, no considera si esos puntos eficientes no pertenecen a *TabuRefset*. Las  $b-p$  soluciones restantes se eligen así:

- Para cada solución  $x \in E \setminus TabuRefset$  se calcula la distancia al punto ideal (normalizada). Digamos que la mínima distancia es  $L_{\infty}^{min}(x)$ . Esta distancia mínima es usado como la probabilidad de que  $x$  sea declarada elegible como una solución de referencia. Esta es la probabilidad de que la solución sea incluida en la lista de soluciones elegibles *LES*.
- De la lista *LES*, se escoge  $b-p$  soluciones con la más mínima distancia a *TabuRefset*. La distancia es medida en relación al *TabuRefset* en lugar de *Refset* para alejarse de áreas que han sido exploradas. *TabuRefset* también es actualizado para evitar seleccionar puntos que son muy cercanos entre sí.

## 2.4 TEORÍA DE LA DECISIÓN MULTICRITERIO

De acuerdo a lo señalado por Prado [14] el proceso de la toma de decisión está conformado por las siguientes etapas: inteligencia, diseño, selección o elección e implementación. En la Figura 2.1 se describen cada una de estas etapas.

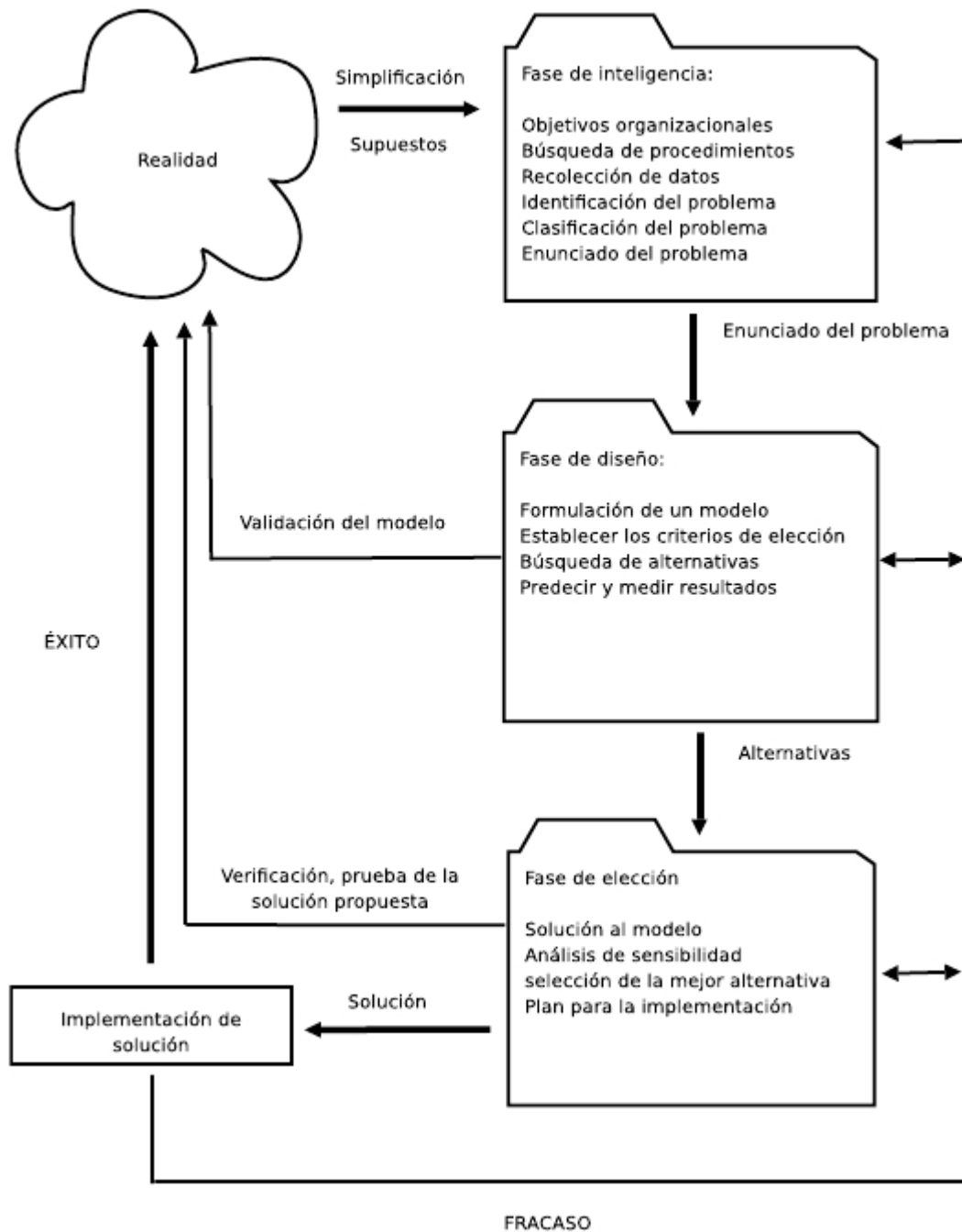


Figura 2.1: Proceso de toma de decisiones [33].

De acuerdo a Bohanec [4] la toma de decisión se clasifica en dos tipos: toma de decisiones por dispositivo artificial y toma de decisiones por humanos. Ver Figura 2.2.

Las ciencias de la decisión cubren tres posibles aspectos en común de la toma de decisión por humanos [4]:

- Normativo: incluye aproximaciones teóricas tales como la teoría de la decisión, teoría de la utilidad multiatributo, entre otras.
- Descriptivo: Está relacionada con la psicología cognitiva, ciencias sociales y conductuales.
- Apoyo a la decisión: Conjunto de disciplinas relacionadas para ayudar a las personas a tomar decisiones.

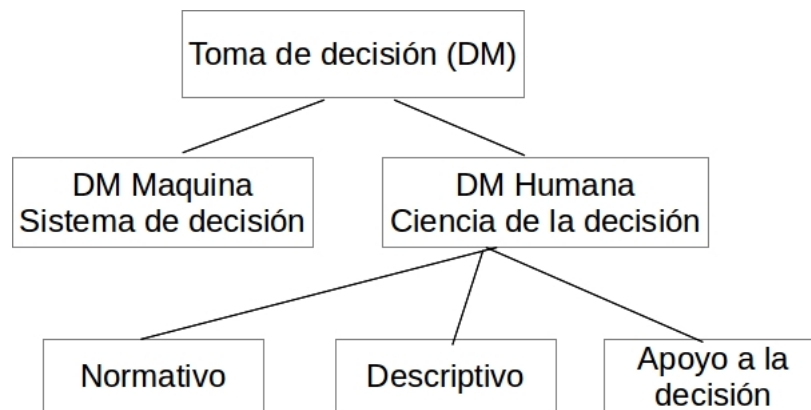


Figura 2.2: El rol del apoyo a la decisión en la toma de decisiones [4].

La mayoría de los problemas de la vida diaria tienen naturaleza multicriterio. Por tal motivo, los problemas multicriterio son extremadamente importantes y requieren un tratamiento especial. La solución a este tipo de problemas no solo depende de los datos involucrados en la evaluación sino también de la subjetividad del tomador de decisiones, misma que refleja sus preferencias que en definitiva son las que se incorporan a los modelos [6].

Los problemas de decisión se clasifican [34]:

- Según la naturaleza de las consecuencias asociadas a las alternativas.

- Decisión bajo certeza.
- Decisión bajo incertidumbre.
- Decisión bajo estricta incertidumbre.
- Según la cardinalidad del conjunto de alternativas.
  - Finito, número pequeño.
  - Infinito, número muy grande o infinito contable o infinito incontable.
- Según las operaciones que se realizan sobre el conjunto de alternativas.
  - Jerarquización.
  - Selección.
  - Clasificación.
- Si el tomador de decisiones es una persona o un grupo de personas.

En los problemas de decisión bajo certeza se utiliza frecuentemente una relación denominada sobreclasificación para representar las preferencias del tomador de decisiones. Esta relación puede interpretarse de la siguiente manera: sean  $a$  y  $b$  dos alternativas del problema de decisión en cuestión, si  $a$  sobreclasifica a  $b$  ( $aSb$ ) puede interpretarse como que existen argumentos claros o razones suficientes para considerar que  $a$  es al menos tan buena como  $b$ .

Tipicamente las preferencias del tomador de decisiones se describen por un sistema de relaciones compuesto por las relaciones P, Q, I y R donde [45]:

- P denota preferencia estricta entre dos alternativas (el tomador de decisiones elige sin dudar una de las dos alternativas que le son presentadas).
- Q representa la preferencia débil (el tomador de decisiones elige una de las dos alternativas pero tiene algunas dudas sobre la preferencia).



- I denota una relación de indiferencia (el tomador de decisiones elegiría ambas alternativas sin mostrar preferencia a favor de una o de la otra).
- R representa la incomparabilidad (el tomador de decisiones rehúsa elegir cualquiera de las dos alternativas considerando que no puede emitir preferencia entre ellas).

El problema FTT se clasifica como un problema de decisión bajo certeza. Promethee es una familia de métodos diseñados para resolver esta clase de problemas que es un método popular y efectivo por su simplicidad y su flexibilidad. En la siguiente subsección se explica este método que es el que se eligió para incorporarlo a nuestra metodología de apoyo a la decisión.

### 2.4.1 PROMETHEE

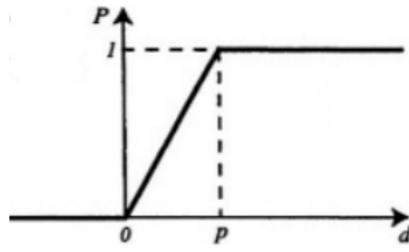
Uno de los métodos que existen para lograr el ordenamiento de un conjunto de alternativas de acuerdo a las preferencias del tomador de decisiones es Promethee. El cual requiere información adicional como, el peso para cada uno de los criterios, el peso más alto refleja el criterio más importante. La suma de todos los pesos debe ser igual a uno. También requiere valores que representen la preferencia e indiferencia del tomador de decisiones [6].

La estructura de preferencia de Promethee está basada en comparaciones de alternativas. Una desviación pequeña entre dos alternativas en un criterio particular indica poca preferencia y mientras mayor sea la desviación mayor preferencia. Esto significa que para cada criterio el tomador de decisiones tiene en mente una función. A fin de facilitar la identificación 6 tipos de funciones de preferencia han sido propuestos [6]. Aquí solo se menciona en la Figura 2.3 las dos funciones que son utilizadas en FTT.

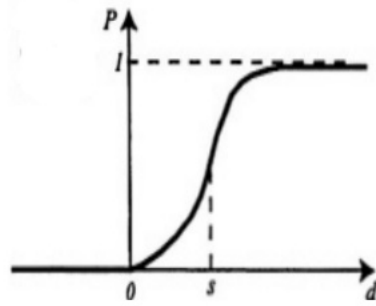
La primera de ellas se llama criterio-V, en esta función mientras la diferencia aumenta, aumenta la preferencia del tomador de decisiones. Cuando sobrepasa el

umbral de preferencia ( $p$ ) existe preferencia estricta. Es el menor valor de la diferencia ( $d$ ) sobre el cual el tomador de decisiones considera que existe preferencia estricta de una de las correspondientes acciones.

La segunda función se llama criterio gaussiano, la función de preferencia se mantiene creciente para todas las desviaciones y no tiene discontinuidades, ni en su forma, ni en sus derivados. Requiere el parámetro  $s$ , determinada de acuerdo a la experiencia obtenida con la distribución normal. Define un punto de inflexión, se recomienda fijar  $p$  y  $q$  para luego fijar  $s$  entre estos umbrales. Si está cerca de las preferencias se verá reforzada por pequeñas desviaciones. Esta función es continua importante para garantizar estabilidad de los resultados.



$$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ \frac{d}{p} & 0 \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$$



$$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2s^2}} & d > 0 \end{cases}$$

Figura 2.3: Funciones de agregación [6].

En las funciones de preferencia mostradas en la Figura 2.3 la información adicional requerida es la siguiente:

- $q$  representa la indiferencia.
- $p$  indica preferencia estricta.

- $s$  valor intermedio entre  $q$  y  $p$ .

Promethee está basado en comparaciones de alternativas por pares. Primero se calcula un índice de preferencia agregada y los flujos de ordenamiento. Digamos que  $a, b \in A$  (conjunto de alternativas) y :

$$\begin{cases} \pi(a, b) = \sum_{j=1}^k P_j(a, b)w_j, \\ \pi(b, a) = \sum_{j=1}^k P_j(b, a)w_j, \end{cases} \quad (2.1)$$

En la Ecuación 2.1,  $\pi(a, b)$  expresa el grado en que  $a$  es preferida sobre  $b$  y  $\pi(b, a)$   $b$  es preferida sobre  $a$ . El flujo positivo (2.2) de ordenamiento expresa como una alternativa  $a$  está superando a todas las otras. A mayor flujo positivo mejor alternativa [6].

$$\theta^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x) \quad (2.2)$$

El flujo negativo (2.3) de ordenamiento expresa como una alternativa  $a$  es superada todas las otras. A menor flujo negativo mejor alternativa.

$$\theta^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a) \quad (2.3)$$

Frecuentemente el tomador de decisiones solicita un ordenamiento completo, mismo que se puede obtener con el flujo neto, que se calcula de la siguiente manera:

$$\theta(a) = \theta^+(a) - \theta^-(a) \quad (2.4)$$

El flujo neto (2.4) es el balance entre el flujo positivo y negativo. A mayor flujo neto, mejor posición en el ordenamiento de las alternativas [6].

*Algoritmo*

1. Para cada criterio  $j$  definir función de preferencia, peso ( $w_j$ ), preferencia( $p$ ) e indiferencia( $q$ ).
2. Amplitud de diferencia entre evaluaciones de alternativas  $d_j(a, b) = g_j(a) - g_j(b)$ .
3. Para cada criterio y cada alternativa aplicar función de preferencia ( $P_j(a, b)$ ).
4. Para cada alternativa determinar el índice de preferencia agregado 2.1.
5. Para cada alternativa calcular el flujo positivo 2.2 y flujo negativo 2.3.
6. Para cada alternativa obtener el flujo neto 2.4.

Promethee permite identificar soluciones satisfactorias para el tomador de decisiones que no puede ser identificadas empleando métodos de la investigación de operaciones clásica.

## 2.5 TEORÍA DEL TRANSPORTE URBANO

El objetivo principal de la planeación del transporte público es ofrecer a la población un servicio de calidad que permita a los pasajeros viajar fácil y rápidamente a una baja tarifa. Además, las agencias de transporte público tienen una misión social, reducir la contaminación y el tráfico [16]. El objetivo de abordar la teoría del transporte urbano, es para que el lector tenga una idea general del problema presentado en esta tesis, las etapas que conforman el proceso del transporte urbano, así como los objetivos de cada una de ellas.

El proceso de planeación se divide en subproblemas que generalmente se resuelven secuencialmente: estratégico, táctico y operacional. Los problemas de planeación estratégica se relacionan con decisiones a largo plazo como el diseño de las rutas y la red. La mayoría de estos problemas caen dentro de la categoría del diseño de la

red y resuelven problemas de asignación como subproblemas. El objetivo de los problemas estratégicos consiste en maximizar la calidad del servicio bajo restricciones de cartera [16].

El diseño de la red es un problema estratégico que consiste en determinar qué arcos incluir en la red, el diseño de la red de transporte incluye ensamblar estos arcos en rutas fijas y determinar la frecuencia de servicio en cada ruta. El resultado del diseño de la red es un conjunto de rutas y sus frecuencias. El objetivo del diseño de la red puede ser minimizar el tiempo total de viaje. Se desea asegurar una cobertura adecuada de la red para brindar acceso a nodos específicos.

Los problemas de planeación táctica conciernen a decisiones relacionadas al servicio ofrecido al público, como las frecuencias de las rutas y la tablas de tiempos. Estos problemas también se enfocan en la calidad del servicio.

El establecimiento de frecuencias es un problema que forma parte de la planeación táctica; su meta es seleccionar las frecuencias que maximicen la calidad del servicio. La tarea más común es diseñar la frecuencias sin exceder la capacidad de los autobuses. Estas frecuencias son especificadas por hora del día y día de la semana.

La tabla de tiempos es otra de las actividades que se encuentran dentro de la planeación táctica y consiste en convertir las frecuencias de servicio en una programación fija. Sus entradas son la estructura de la red, frecuencia de servicio y los tiempos de cabecera. El resultado es un conjunto de viajes y los tiempos programados en las terminales. Es en base con la tabla de tiempos que la asignación de vehículos y asignación de operadores (actividades de la planeación operacional) son construídas [16].

Los problemas operacionales están relacionados a como la operación debe ser conducida para ofrecer el servicio propuesto al menor costo. El objetivo de los problemas operacionales es claramente minimizar el costo total.

La asignación de vehículos es la primera actividad de la planeación operacional, juega un rol importante en la administración de las agencias de transporte público

ya que es la primera actividad que se enfoca en minimizar los costos. La asignación de vehículos es la programación de los mismos para satisfacer los viajes fijados al menor costo [16].

La siguiente actividad es la asignación de operadores, al igual que la asignación de vehículos esta actividad es importante para la agencia de transporte público, desde el punto de vista económico, ya que determina el total a pagar a los operadores, consiste en determinar los días de trabajo para los operadores a fin de cubrir los vehículos.

La Figura 2.4 muestra las etapas del proceso de transporte urbano, los datos que se requieren como entrada y lo que cada etapa produce [10].

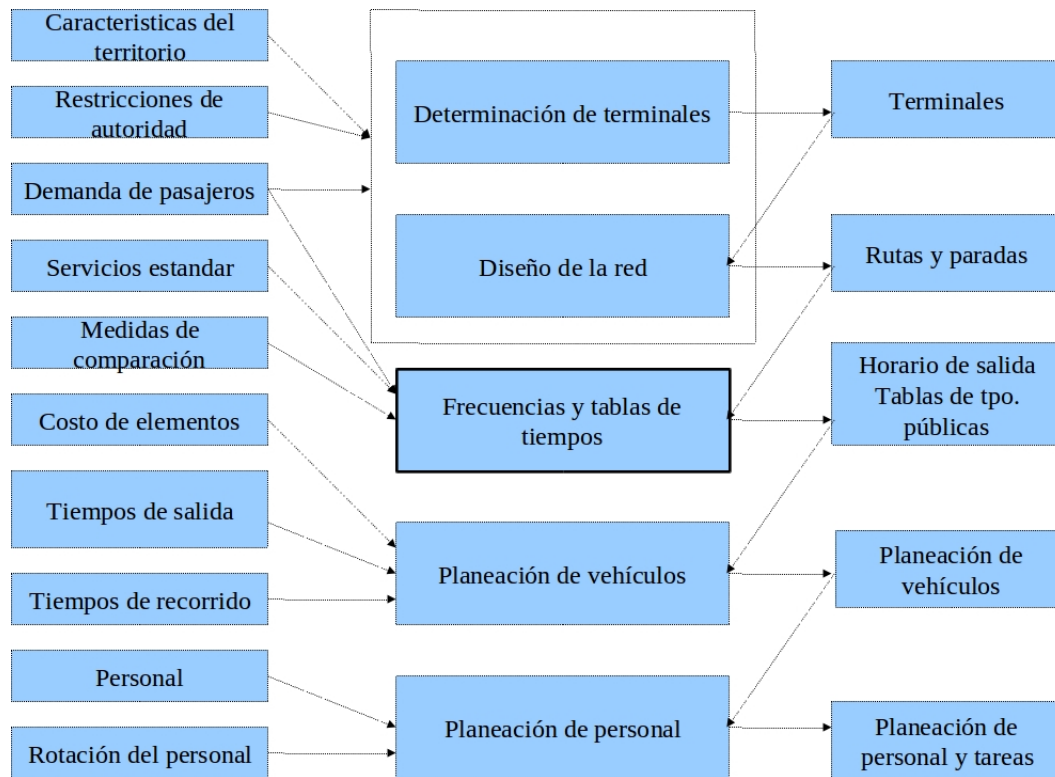


Figura 2.4: Proceso de planeación del transporte urbano [10].

A continuación, se presentan algunos conceptos básicos del transporte [18]:

- *Ruta*: Una ruta contiene secuencias ordenadas de paradas de autobús, con un

origen y destino.

- *Nodo*: Es un lugar o tramo donde los autobuses se detienen para carga y descarga de pasajeros.
- *Tiempo de cabecera*: Es un tiempo definido entre dos salidas sucesivas de cada ruta.
- *Frecuencia*: Número posible de salidas en cada ruta dentro de un intervalo de tiempo.
- *Periodo pico*: Son las horas en las que existe mayor cantidad de pasajeros.
- *Periodo valle*: Son las horas en las que existe menor cantidad de pasajeros.
- *Transición entre periodos*: Es cuando la programación de los autobuses pasa de un periodo pico a un periodo valle o viceversa con la cantidad justa de viajes a fin de satisfacer la demanda. Por lo tanto, en la transición de un periodo pico a uno valle irá disminuyendo gradualmente la cantidad de viajes y en el caso contrario (de periodo valle a periodo pico) irá incrementando la cantidad de viajes, en ambos casos satisfaciendo la demanda.
- *Sincronización*: Es la llegada de dos autobuses de dos rutas diferentes a un mismo nodo dentro de una ventana de tiempo.

## 2.6 ESTADO DEL ARTE

### *Metodología desarrollada para llevar a cabo el análisis bibliográfico*

A continuación, se describen de forma general, los pasos de la metodología que se emplea para llevar a cabo el análisis bibliográfico:

1. Primeramente se definen los temas y subtemas relacionados al trabajo de investigación.

2. Buscar 50 y 60 artículos más citados relacionados con el tema y según un conjunto de palabras clave. Ordenar en forma descendente según número de citas. Seleccionar los 20 más citados o los que tengan 50 citas o más.
3. En el total de artículos identificar los 20 autores más citados (aplicar un procedimiento similar al anterior para seleccionarlos) de los 50 o 60 artículos seleccionados anotar los autores y coautores y sumar las citas de los artículos en los que aparezcan. Ordenar por número de citas descendentes y seleccionar los 20 primeros.
4. Clasificar artículos y autores según: subtemas, fecha de publicación considerándolos de la siguiente manera:
  - clásico: antes del 2000,
  - contemporáneo: del 2000 al 2008 y
  - recientes: del 2008 a fecha actual.
5. Posteriormente se crea un libro de MS Excel, que contenga dos tablas en hojas separadas, una para los 20 artículos más citados y otra para los 20 autores más citados. La tabla de artículos contiene las columnas siguientes: año, autores, título, revista (o editorial en caso de libro, o institución en caso de tesis), palabras clave del artículo, subtema, número de citas. La tabla de autores contiene las columnas siguientes: nombre completo, número de citas de artículos clásicos, número de citas de artículos contemporáneos y número de citas de artículos recientes, número de artículos clásicos, número de artículos contemporáneos y número de artículos recientes, número de subtemas.
6. Repetir los pasos 2-4 restringiendo ahora el dominio a las listas de bibliografías que aparecen en los 20 artículos. Actualizar en consecuencia las tablas de excel creadas en el paso 5. Como resultado se seleccionan los 20 artículos más citados y los 20 autores más citados.
7. Para cada uno de los artículos crear ficha bibliográfica que contenga:



- Título.
- Autores.
- Revista/editorial, año de publicación.
- Subtema.
- Resumen.
- Conclusiones.
- Novedad científica.
- Crítica personal resaltando con relación al tema o subtema que falta por tratar, o se trata de forma insuficiente o poco rigurosa, o el alcance es limitado, etc...

Estos artículos constituyen un núcleo básico para continuar profundizando en la bibliografía relacionada con el tema sujeto a investigación.

En la Tabla 2.1 se muestra la cantidad de artículos más citados de acuerdo a la clasificación presentada anteriormente.

Clásicos	Contemporáneos	Recientes
9	17	6

Tabla 2.1: Artículos más citados.

En la Tabla 2.6 se presenta la cantidad de autores más citados de acuerdo a la clasificación presentada antes.

Clásicos	Contemporáneos	Recientes
8	18	4

Tabla 2.2: Autores más citados.

Los artículos más citados se dividen por subtemas, la Tabla 2.3 muestra los resultados.

Subtema	No. de artículos
Tablas de tiempo	13
Diseño de la red	18
Asignación de personal	1

Tabla 2.3: Clasificación de artículos por subtema.

En la Tabla 2.4 se presentan el título, año de publicación, autor y el número de citas de los cinco artículos más citados.

Artículo	Año	Autor	No. de citas
Urban transit operations, planning, economics	2005	Vuchik Vukan R	104
Creating bus timetables with maximal synchronization	2001	Ceder, Golany, Tal	53
Methods for creating bus timetables	1987	Avishal Ceder	51
Setting frequencies on bus routes theory and practice	1981	Furth PG and Wilson NHM	46
Periodic timetable optimization in public transport	2007	Christian Liebchen	43

Tabla 2.4: Los cinco artículos más citados.

### 2.6.1 ANÁLISIS CRÍTICO.

Entre los artículos más citados podemos encontrar el propuesto por Wilson & Furth [23], quienes indican que una de las principales decisiones que toma el planificador es la frecuencia de cada ruta. El modelo que presentan asigna los autobuses disponibles en el horizonte de planeación a las rutas, al mismo tiempo que maximiza el beneficio neto social, ahorrando tiempos de espera y de una manera colineal a los viajes se puede hablar de reducción del congestionamiento vial, contaminación y ahorro de energía. Este problema está sujeto a restricciones de subsidio, tamaño de la flota vehicular, y políticas de tiempo de cabecera. El modelo propuesto maneja un solo objetivo y únicamente trata el problema de frecuencia de paso. En FTT no solo se considera la frecuencia de paso, sino que también se genera una tabla de tiempos que considera costos, tiempos de transbordo, transferencia entre periodos y sincronizaciones. Una de las principales limitaciones del modelo propuesto por Wilson & Furth [23] es el supuesto de la independencia de todas las rutas en el sistema.

En el trabajo propuesto por Wilson & Furth [23] se utiliza una instancia de 15 rutas. Los datos y supuestos más importantes son los siguientes:

1. Se examina un periodo pico y un periodo valle. Los tiempos de cabecera durante estos periodos son constantes.
2. Los tiempos de viaje redondo (round-trip) son usados con un tiempo escala del 25 % del tiempo de ejecución (run time).
3. Los costos por corrida se basan en la Autoridad de Transporte de la Bahía de Massachusetts (MBTA por sus siglas en inglés), los costos por milla-vehículo y por hora-conductor.
4. Se usa el beneficio promedio por corrida de 18 centavos.
5. El déficit del sistema es usado como el subsidio disponible y el número de vehículos usados en el periodo pico de la mañana es usado como la restricción del tamaño de flota en cada periodo.

6. La política de tiempo de cabecera de 30 minutos en periodos pico y de 60 minutos en periodos valle son basados en MBTA.
7. MBTA usa dos estándares de factor de carga para periodos pico. Para periodos picos de 2 horas el factor de carga no debe ser mayor a 1.2, para periodo pico de media hora no debe ser mayor que 1.4. La política de factor de carga para periodos valle es de 1.0 según la MBTA.
8. Se usa una capacidad del autobús de 45 asientos para las restricciones del factor de carga.
9. Los pasajeros por rutas son tomados de una encuesta de 1978 [23].

También, se incluye en el trabajo de Wilson & Furth [23] un caso de estudio, en el que el análisis de sensibilidad demuestra que los resultados son muy robustos con respecto a los parámetros utilizados. El modelo también incorpora una función objetivo que consiste en una suma ponderada de pesos del total de pasajeros y el total de ahorros de tiempos de espera de los pasajeros.

Entre los resultados de [23] se tienen que 59 de los 70 autobuses disponibles son usados en el periodo pico. Solo un 44 % del total de subsidio es asignado al periodo pico comparado con el 58 % del sistema actual. Los periodos picos son fuertemente restringidos por la capacidad. En general, las rutas más cortas tienen las cargas mas pequeñas pero no necesariamente tienen el beneficio más alto. Tal vez la debilidad más grande de este caso de estudio es la incertidumbre de la función de demanda. Para probar la importancia de la incertidumbre [23] un conjunto de experimentos son hechos para variar los parámetros de demanda y ver si la asignación de recursos cambia significativamente los resultados que se obtienen, cuando la demanda asume ser inflexible difieren poco de aquellos donde la demanda es más realista.

Otro de los trabajos más citados es el presentado por Liebchen [31], quienes modelan la optimización de la tabla de tiempos para la planificación de las salidas de trenes usando el problema de programación de eventos periódicos (PESP). El autor

propone un enfoque sistemático para seleccionar una buena formulación basada en la búsqueda de una representación gráfica, a través de ciclos cortos y agregando desigualdades válidas. Posteriormente, realiza un análisis para demostrar el beneficio de estas estrategias. Los arcos del grafo representan un evento (salida o llegada a una estación), una tabla de tiempos asigna a cada vértice un punto en el tiempo entre 0 y el horizonte de planeación.

En el artículo de Liebchen [31] propone encontrar una tabla de tiempos que satisfaga el máximo número de restricciones. Para ello, el autor realiza un estudio computacional unificado que incluye cut & branch (algoritmo de programación entera), cumplimiento de restricciones y algoritmos genéticos. El caso de estudio se realiza en el sistema de trenes de la ciudad de Berlín, y la cantidad de líneas utilizadas son de 10 a 40. Los resultados obtenidos con algoritmos genéticos y cut & branch se pueden considerar como buenos. Las técnicas de programación entera son extremadamente sensibles con respecto a la elección de ciertos parámetros importantes; para las instancias de tamaño medio donde las técnicas de programación entera aún alcanzan una solución óptima, la calidad alcanzada con algoritmos genéticos no es muy buena. Comparados con la tabla de tiempos con la que el sistema de trenes contaba, la tabla de tiempos obtenida a través de este estudio [31] ofrece mejoras simultáneas en dos criterios clave que típicamente están en conflicto: tiempo de transferencia (aumentó en un 8 %) y el tiempo de permanencia (se redujo en un 30 %), y se concluye que la tabla de tiempos podría ser operada con un tren menos.

En el trabajo de Liebchen una tabla de tiempos periódica es una tabla de tiempos simétrica, es decir que los tiempos son idénticos en cada viaje. En FTT todos los viajes de una ruta requieren igual tiempo para completarse en un mismo periodo. Se tiene una cantidad mayor de funciones objetivo y se incluye la característica de multiperiodo.

Otro artículo relevante en el tema de investigación es el de Anitha Eranki [18], en el que se propone un modelo entero mixto cuyo objetivo es maximizar el número de sincronizaciones sujeto a: la primera salida es antes del tiempo máximo

de cabecera y la última salida es antes del fin del periodo de planeación, la diferencia entre dos salidas consecutivas está dentro de los tiempos de cabecera. Eranki en su trabajo agrega una característica especial permitiendo que las sincronizaciones se den dentro de una ventana de tiempo. Sin embargo, al agregar estos tiempos de espera el problema se vuelve más complejo, haciendo que el problema sea difícil de resolver en un instancia real. Debido a su alta complejidad Eranki propone una heurística para resolver el problema.

Una instancia con la que se probó el funcionamiento de la heurística propuesta por Eranki, consta de 3 nodos y 6 rutas, los tiempos mínimos y máximos de cabecera son 14 y 20 minutos para cada ruta, el periodo de planeación está dentro del intervalo  $[0, 240]$  minutos, cada ruta tiene una frecuencia de 12, los tiempos mínimos y máximos de espera son de 5 y 10 minutos en cada nodo respectivamente; de esta forma se obtuvieron 58 sincronizaciones en el nodo 2 y 187 en el nodo 3, dando un total de 245 sincronizaciones. Ahora bien, si se considera el supuesto de que un autobús de cualquier ruta dada puede encontrar con al menos dos autobuses de otra ruta, se tiene que el número máximo de sincronizaciones al nodo 2 es de 72 y en el nodo 3 de 360 sincronizaciones.

En este trabajo Eranki hace mejoras al modelo propuesto por Ceder et al. [12], dando una mayor flexibilidad para lograr una sincronización al agregar ventanas de tiempo. Considera la frecuencia como un parámetro a su problema, en su propuesta solo cuenta con un solo objetivo, maximizar el número de sincronizaciones; objetivo que beneficia únicamente a un actor social, su modelo solo utiliza un solo periodo. Además, no relaciona su problema con alguna otra etapa del proceso de planeación del transporte urbano. En cambio, en FTT se integran el cálculo de frecuencia de paso y las tablas de tiempo, considera objetivos que benefician a todos los actores sociales involucrados en el problema de planeación del transporte urbano.

El trabajo propuesto por Ceder et al. [12] presenta un modelo diferente que permite a los planeadores establecer restricciones de tiempos de cabecera para cada ruta, introducir diferentes frecuencias a cada ruta, además de aplicar otras restric-

ciones. La función objetivo consiste en maximizar el número de llegadas simultáneas en el sistema sujeto a que, el primer viaje sale antes del tiempo máximo de cabecera, el último viaje sale antes del fin del horizonte de planeación, la diferencia entre dos salidas consecutivas debe estar dentro de los tiempos de cabecera y la sincronización existe si la llegada de las dos rutas a un nodo ocurre en el mismo tiempo.

En este mismo trabajo, Ceder et al. proponen una heurística para la resolución de este problema, ya que resolverlo de manera exacta puede llevar horas incluso días. Al utilizar un algoritmo heurístico desarrollado por los autores, se hace posible obtener una solución en un tiempo razonable. El heurístico es probado con un ejemplo de 2 rutas y 2 nodos, la ruta 1 tiene una frecuencia de 4, los tiempos de cabecera mínimo y máximo de 5 y 15 minutos, la ruta 2 tiene una frecuencia de 3 y los tiempos de cabecera mínimo y máximo de 8 y 20 minutos. El número máximo de sincronizaciones para esta instancia es de 4.

En este trabajo Ceder et al. consideran la sincronización como la llegada de dos rutas a un nodo en un mismo tiempo. Con esto no se le proporciona a los usuarios flexibilidad para cambiar de una ruta a otra en caso de ser necesario. También toma la frecuencia como un parámetro para su problema y tiene un solo objetivo que es maximizar el número de llegadas simultáneas, el cual beneficia a un solo actor social del proceso de transporte, además en este trabajo no considera el multiperiodo y los problemas asociados a esto. En FTT además de maximizar el número de sincronizaciones, también se consideran otros objetivos y es multiperiodo.

En otros trabajos, Ceder [9, 11] propone cuatro métodos para determinar la frecuencia de paso agrupados en métodos de máxima carga (point check) y métodos de perfil de carga.

Es común, que los datos de perfil de carga se recopilen de forma manual, cada cierta cantidad de años se actualizan, a lo largo de toda la longitud de la ruta (ride check). Por lo general, la información más reciente de carga de pasajeros vendrá de una o más paradas seleccionadas a lo largo del tramo de la ruta donde el autobús

lleva la máxima carga. La información de los métodos de máxima carga es estudiada varias veces al año con el propósito de una posible revisión a los horarios que pueden ser tablas de tiempos nuevas o ajustes a las tablas de tiempo ya existentes.

Los métodos basados en perfil de carga brindan información más completa que los basados en la máxima carga, pero a un costo mas alto debido a la necesidad, ya sea de revisores de datos (data checkers) adicionales para proporcionar los datos requeridos o un sistema de vigilancia automatizado (por ejemplo, de APC, LAV, etc...).

Los cuatro métodos para determinar la frecuencia de paso que a continuación se presentan, se basan en los perfiles anteriormente presentados y dan la oportunidad al tomador de decisiones de evaluar el número de corridas de vehículos y evitar la sobrecarga. Estos métodos son importantes en FTT pues son empleados en la metodología de solución como se puede ver en el modelo presentado en el Capítulo 3.

■ Métodos de máxima carga

- Método 1: Este método se basa en la obtención de datos en un punto durante todo el día. Este punto representa el segmento de máxima carga en el día a lo largo de toda la ruta. Al calcular la frecuencia con este método se garantiza que en el punto de máxima carga de todo el día para una determinada ruta no presentará sobrecarga. La frecuencia se calcula:

$$F_{1j} = \max\left(\frac{P_{mdj}}{d_{oj}}, F_{mj}\right),$$

$$P_{md} = \max_{i \in S} \sum_{j=1}^q P_{ij} = \sum_{j=1}^q P_{i^*j}$$

,

$$P_{mdj} = P_{i^*j},$$



donde  $F_{mj}$  es la frecuencia mínima requerida para el periodo  $j$ ,  $S$  representa todas las paradas  $i$ , excluyendo la última parada,  $i^*$  es el punto de máxima carga en el día,  $P_{ij}$  representa el promedio del total de pasajeros a bordo,  $P_{md}$  carga máxima observada en ese punto,  $d_{oj}$  es la ocupación deseada.

- Método 2: Garantiza que el punto de máxima en un determinado periodo no excederá la carga deseada:

$$F_{2j} = \max\left(\frac{P_{mj}}{d_{oj}}, F_{mj}\right),$$

donde  $P_{mj} = \max_{i \in S} P_{ij}$ .

El objetivo de estos métodos es garantizar el espacio adecuado para acomodar al máximo número de pasajeros a bordo a lo largo de la ruta en un periodo de tiempo dado [11].

- Métodos de perfil de carga
  - Método 3: Garantiza que los pasajeros en el tramo de máxima carga no experimentan sobrecarga. Este método es apropiado cuando el planificador quiere conocer la cantidad de salidas que pueden esperarse teniendo el autobús al nivel máximo de la ocupación deseada sin llegar a la sobrecarga. Sin embargo, puede resultar en un viaje incómodo para los pasajeros si la carga promedio está por encima de la ocupación deseada. La frecuencia a través de este método se calcula según:

$$F_{3j} = \max\left(\frac{A_j}{d_{oj} \cdot L}, \frac{P_{mj}}{c}, F_{mj}\right),$$

$$A_j = \sum_{i \in S} P_{ij} \cdot l_i,$$

$$L = \sum_{i \in S} l_i,$$

donde,

$l_i$  : Distancia entre el nodo  $i$  y el siguiente nodo (distancia entre nodos).

$A_j$  : Área de pasajeros bajo perfil de carga en periodo  $j$ .

$L$  : Longitud de la ruta.

$d_{oj}$  : Ocupación deseada.

$F_{mj}$  : Frecuencia mínima requerida.

$P_{mj}$  : Es la máxima carga observada (a través de todas las paradas) en cada periodo  $j$ .

$c$  : Capacidad del vehículo.

- Método 4: Para controlar la situación que se puede presentar con el método 3, es posible establecer un criterio de nivel de servicio considerando la porción total de la ruta teniendo cargas mayores que la ocupación deseada. Elimina o controla la posibilidad de un viaje no placentero.

$$F_{4j} = \max\left(\frac{A_j}{d_{oj} \cdot L}, \frac{P_{mj}}{c}, F_{mj}\right)$$

s.a.

$$\sum_{i \in I_j} l_i \leq \beta_j \cdot L,$$

donde matemáticamente  $I_j = \{i : \frac{P_{ij}}{F_j} > d_{oj}\}$

Los datos requeridos para la obtención de la frecuencia son: distancia entre nodos (en kilómetros), ocupación deseada (por autobús), políticas de tiempos de cabecera para cada intervalo de tiempo, el número de autobuses en cada intervalo, la carga observada (promedio) entre dos paradas adyacentes y para cada intervalo de tiempo, además de la capacidad del autobús.

Estos cuatro métodos cumplen con dos objetivos principales:

1. Establecer las frecuencias para mantener una calidad de servicio adecuado y minimizar el número de autobuses y
2. Ubicar de manera eficiente los puntos de carga de pasajeros.

Con estos métodos se puede obtener la frecuencia para una ruta, de hecho Ceder [11] menciona que se puede hacer una combinación de métodos e indica el proceso

para seleccionar el método más apropiado. En el diagrama de flujo de la Figura 2.5 se presenta este proceso. Primeramente, se requiere tener un registro de cantidad de pasajeros, posteriormente se construye el perfil de carga por periodo, después se calcula la densidad del perfil de carga  $\rho$ , que es el total de pasajeros/kilómetro dividido por el producto de la longitud de la ruta y la máxima carga. Si la densidad es menor o igual a 0.5, entonces se calcula la frecuencia con el método 3 y método 4 (con diferentes porcentajes), se mantiene los resultados del método 3 como una cota inferior, se selecciona un porcentaje adecuado, se utiliza el método 4 con el porcentaje seleccionado. Si la densidad es mayor que 0.5, entonces, se compara el método 1 y método 2 con una prueba estadística  $\chi^2$ . Si el valor obtenido para el método 1 es igual al método 2 entonces se utiliza el método 1, en caso contrario se utiliza el método 2.

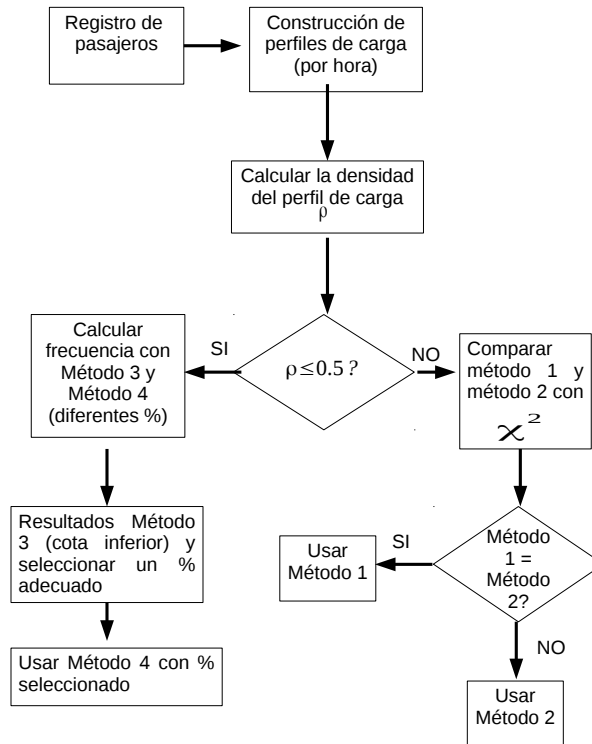


Figura 2.5: Diagrama de bloque para determinar la frecuencia de paso [11].

También [9, 11], proponen dos técnicas para la creación de tablas de tiempo con transiciones entre periodos con demandas diferentes. Al aplicar estas técnicas se logra controlar el nivel de servicio a lo largo de periodos contiguos que tengan demandas dispares, disminuyendo así el costo de operación. En FTT se emplea tiempos de cabecera variables con cargas promedio iguales, método que se explica más adelante. En comparación con el trabajo presentado por [11] la autora de FTT considera otros criterios además del costo, los cuales se ven en el Capítulo 3.

***Tiempos de cabecera iguales:*** El objetivo es establecer en el tiempo de transición una ocupación deseada promedio en lugar de un tiempo de cabecera promedio. Para lograr lo anterior se utiliza el siguiente principio [9, 11].

*Principio:* Para cada periodo de tiempo se determina la frecuencia requerida. En el tiempo de transición entre dos periodos, se combinan las dos frecuencias, así la carga esperada es igual a la ocupación deseada promedio. Esto permite ahorrar algunos viajes innecesarios y también permite estabilizar el promedio de carga durante el segmento de transición entre periodos.

Ceder [11] obtiene la hora de salida mediante esta técnica utilizando la ecuación de la recta que pasa por dos puntos:

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}. \quad (2.5)$$

Para ejemplificar, utilizamos los puntos que aparecen en la Figura 2.6 (6:00,1) y (7:00,3.68). Primeramente, se convierte la hora en decimales así las 6:00 y 7:00 son equivalentes a 6 y 7 respectivamente, 1 es la primera salida predeterminada, 3.68 es la frecuencia obtenida para el periodo de 6:00 a 7:00 más la frecuencia predeterminada,  $y$  es la frecuencia acumulativa. Ahora bien, aplicando la ecuación 2.6.1 obtenemos la hora de salida para  $y=2$ ,  $x = \frac{2-1}{3.68-1} \cdot (7 - 6) + 6 = 6.37$  que en hora-minutos indica las 6:22. El procedimiento se repite para el resto de las frecuencias.

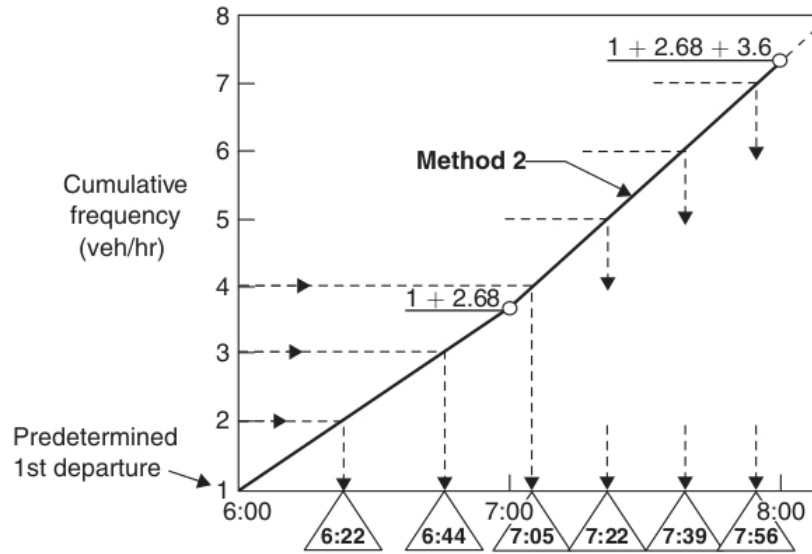


Figura 2.6: Tabla de tiempos con cabecera iguales [11].

***Tiempos de cabecera variables con cargas promedio iguales:*** El objetivo de esta técnica es establecer la hora de salida para cada autobús en un periodo de tiempo dado; así la máxima carga se aproximará a la ocupación deseada de ese periodo. En otras palabras, el objetivo es desplazar los horarios de salida. Así, en lugar de tener salidas separadas de manera uniforme, se tendrán salidas no uniformes para obtener cargas promedio iguales en el punto de máxima carga. Para lograr esto se propone el siguiente principio.

***Principio:*** Para cada salida de autobús observada se determina la llegada uniforme de pasajeros al punto de máxima carga. Basado en este se dibuja una curva acumulativa de la máxima carga observada en cada autobús con respecto a su tiempo de salida. Se construyen los nuevos tiempos de salida en la curva acumulativa mediante la coordinación apropiada de la ocupación deseada acumulada y el tiempo, [9, 11].

Este principio satisface los siguientes supuestos: 1) la máxima carga consi-

derada en cada autobús es un valor representativo de la máxima carga realmente observada; 2) los pasajeros observados a bordo en el punto de máxima carga son acumulados de manera uniforme.

Ceder [11] obtiene la hora de salida mediante esta técnica utilizando un procesamiento manual, debido a lo cual para poder implementarlo en FTT mediante computadora fue necesario realizar un estudio de este método. Así la autora consigue saber que utilizando la ecuación 2.6.1 se puede tener la hora de salida. Para ilustrarlo utilizamos los siguientes puntos de la Figura 2.7 (6:15,35) y (6:50,100). Primero, es necesario convertir las horas en decimales, así 6:15 es equivalente a 6.25 y 6:50 es equivalente a 6.83, las cargas observadas acumuladas son representadas por 35 y 100 y  $y$  es la ocupación deseada del periodo. Ahora  $\frac{x-6.25}{6.83-6.25} = \frac{50-35}{100-35}$ , entonces  $x = \frac{50-35}{100-35}(6.83 - 6.25) + 6.25$ . El valor de  $x=6.38$  que convertido en horas es equivalente a 6:23.

Es importante hacer notar que en esta técnica la carga observada en el instante de salida no debe exceder la ocupación deseada del periodo.

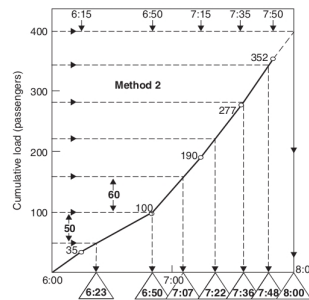


Figura 2.7: Tabla de tiempos con cargas promedio [11].

Con estas técnicas se puede obtener la tabla de tiempos para una ruta en un determinado periodo de planeación y permite manejar la transición suave entre periodos con demandas dispares. Sin embargo, no considera diferentes criterios ni relaciona su trabajo con otras etapas del proceso de planeación del transporte, tal como se hace en FTT, pues recordemos que se consideran diferentes criterios, además la etapa de frecuencia de paso y tabla de tiempos están integradas.

Chakroborty [13], propone un modelo dónde maneja el diseño de la red y la creación de tablas de tiempo de manera secuencial. En su modelo, incluye restricciones para el problema de tablas de tiempo relacionadas con el tamaño de la flota vehicular, capacidad del autobús, ventana de tiempos de espera, políticas de tiempos de cabecera y tiempos de transferencia. Dos de sus restricciones garantizan que una persona pueda transbordar al siguiente autobús disponible en el nodo de transferencia.

El objetivo del modelo es minimizar los tiempos de transferencia y de espera. En el modelo matemático propuesto se supone que la capacidad del autobús es mayor que la demanda y que los tiempos de llegada de los autobuses son deterministas cuando en realidad son estocásticos y resolver un problema de manera exacta con estas características es complicado. Sin embargo, al implementar el algoritmo genético considera los tiempos de llegada estocásticos y la capacidad del autobús limitada. Utiliza algoritmos genéticos para resolver el problema y un mecanismo de optimización evolutiva como herramienta para resolver el problema de diseño de red. Los resultados de diseño de red son superiores (según el autor) en todos los aspectos (porcentaje de demanda satisfecha sin transferencia, porcentaje de demanda satisfecha con una transferencia, porcentaje de demanda satisfecha con dos transferencias, porcentaje de demanda insatisfecha, tiempo promedio de viaje, ahorro total de tiempo de viaje) y sus resultados remarcan que algoritmos genéticos es un metaheurístico apropiado para los problemas del diseño de red, mientras para los resultados de tablas de tiempos se presentan 5 casos diferentes definidos por el número de nodos de transferencias, tiempo de llegada determinista o estocástico, capacidad del autobús y tamaño de flota vehicular. Algunos de los resultados obtenidos son un balance de sus características, cambios marginales de un escenario a otro, el tiempo de espera promedio se reduce conforme la capacidad del autobús aumenta, al comparar horarios con tiempo de espera estocástico y determinista, el tiempo obtenido por el método estocástico es menor que el determinista. La propuesta de [13] maneja dos etapas del proceso de planeación del transporte urbano de manera secuencial. Sin embargo, en FTT las etapas que se consideran son de manera integrada, se consi-

deran otros objetivos además de los tiempos de transferencia, FTT es también un problema multiperiodo característica que no es considerada por [13]. Salvo la consideración del tiempo estocástico, el modelo en FTT es más completo que el propuesto por Chakroborty.

Fang Zhao & Xiaogang Zeng [56], presentan un heurístico que maneja los problemas de diseño de red, tiempos de cabecera y tablas de tiempo de manera integrada. La meta es identificar una red que minimize el costo de los pasajeros. La metodología está basada en un algoritmo de búsqueda local iterativa combinada con recocido simulado, búsqueda tabú y greedy.

Los supuestos que se establecen en este trabajo son: los tiempos de cabecera y tabla de tiempo para rutas individuales permanecen sin cambio en el periodo que se está analizando, la elección de ruta de los pasajeros está hecha por el menor tiempo de viaje, los autobuses tienen la misma capacidad y pueden ser asignados a cualquier ruta, cualquier origen-destino que requiera más de 2 transferencias se considera como no servido por el sistema, los pasajeros llegan de manera aleatoria a la parada del autobús para el abordaje inicial, entre otros.

Para probar la eficacia de su método utilizan un problema de la literatura que tiene 15 nodos, una demanda de 15,570 viajes diarios, la penalidad de transferencia es de 5 minutos. De acuerdo a los autores los resultados que obtuvieron tienen mejoras significativas sobre los trabajos existentes. Los viajes con cero transferencias aumentaron de un 14.38 % a un 35.66 %, los viajes con una transferencia aumentaron de un 55.17 % a un 92.33 %. Otra observación que se puede hacer de los experimentos hechos, es que el costo del pasajero es sensible al número de vehículos, que refleja el costo del operador. Dicho fenómeno necesita un mayor estudio pues tal implicación es innecesaria.

En FTT, no se genera el diseño de la red y los tiempos de cabecera son un parámetro, a diferencia del trabajo propuesto por Fang Zhao & Xiaogang Zeng, FTT considera otros objetivos además del costo y se presenta el problema como



multiperiodo. Es importante resaltar que en el trabajo de Fang Zhao & Xiaogang Zeng ya se integran dos etapas del proceso de transporte urbano.

El trabajo de Chung Min Kwan & C.S. Chang [30] presenta una nueva medida a la sincronización de tablas de tiempo, aplicado en trenes. El objetivo es minimizar la insatisfacción de los pasajeros y la desviación total de la tabla de tiempos sincronizada contra la tabla de tiempos original sin sincronizar asignando una penalidad cuando ocurren desviaciones. Las restricciones que se incluyen en esta modelación son cotas en los tiempos de cabecera, en los tiempos que dura el tren en la estación y en los tiempos que les toma cambiar el tren de dirección, también se incluye la capacidad del tren, número de trenes y conductores disponibles.

Hicieron algunos supuestos en relación al flujo de pasajeros, como el tiempo de transferencia es constante y fijo, todos los pasajeros que realizan transbordo prefieren tomar el siguiente tren inmediato. Utilizan NSGA2 para resolver el problema, pero le hacen tres modificaciones. La primera reemplazan los operadores de mutación y crossover normales con los operadores de evolución diferencial. La segunda mejora es que incorporan un dominio conocido en la forma de solución sin sincronizar en la población inicial de NSGA2 para mejorar el conjunto de soluciones generadas, a este proceso se le llama semillado y la última mejora es combinar NSGA2 y evolución diferencial con técnicas de búsqueda local como *hill climbing*, recocido simulado y búsqueda tabú. Se realizaron pruebas en un sistema de trenes con líneas bidireccional, analizaron un periodo pico matutino y los resultados que se obtuvieron demuestran que NSGA2-DE demuestra tener mejor convergencia y mejor dispersión de soluciones que NSGA2, el semillado ayuda a mejorar la convergencia del algoritmo multiobjetivo evolutivo y la combinación evolutiva brinda soluciones más finas. La solución genera una frontera de Pareto con soluciones múltiples relevantes que proveen flexibilidad de elección al tomador de decisiones. La metodología empleada en este artículo muestra una mejora considerable en términos de esfuerzo computacional, convergencia y dispersión.

En este enfoque se introdujeron dos nuevos conceptos *recién perdido* cuando al

llegar al andén del tren justo se acaba de ir y *recién encontrado* cuando al llegar al andén el tren va llegando, solo aplica para un único periodo de tiempo.

Ciertamente, los métodos de Chung Min Kwan & C.S. Chang [30], no se pueden aplicar a FTT. Sin embargo, es conveniente mencionarlo, la modelación multiobjetivo contiene ideas interesantes que sirven de guía para FTT.

Szeto & Wu [48] presentan un modelo donde resuelven el diseño de la red y el establecimiento de la frecuencia de manera simultánea. Su objetivo es mejorar el servicio de los autobuses reduciendo el número de transferencias y el tiempo total de viaje (incluye tiempo de espera y tiempo en el autobús), dentro de sus restricciones se encuentra el tamaño de la flota vehicular, frecuencia, tiempo promedio de viaje, limitar el número de paradas. Los autores mencionan que solo unos pocos investigadores han atacado el problema de diseño de red y establecimiento de frecuencia de manera simultánea.

El problema investigado en este artículo se caracteriza por dos aspectos que lo hacen distinto a los demás, primero los objetivos y restricciones son diferentes a los vistos en otros artículos, segundo el diseño del estudio de la red de autobuses es diferente; el diseño envuelve la planeación de las rutas troncales de autobuses para conectar las áreas suburbanas con el área urbana.

El método de solución propuesto por Szeto & Wu [48] es un algoritmo genético, desarrollado para resolver el problema de diseño de red, mientras que un heurístico es incorporado al algoritmo genético para resolver el problema de frecuencia. También, tiene un mecanismo de control de diversidad basado en distancia hamming la cual se define como el número de bits que tienen que cambiarse para transformar una palabra de código válida en otra palabra de código válida. Si dos palabras de código difieren en una distancia  $d$ , se necesitan  $d$  errores para convertir una en la otra.

Szeto & Wu realizaron experimentos con una instancia de 10 rutas y 176 autobuses, crean un total de 8 conjuntos de algoritmos genéticos con diferentes configuraciones, para cada uno de los conjuntos los tiempos computacionales son similares

y aceptables. Sin embargo, se observa que es benéfico aplicar todos los operadores de mutación en el algoritmo para obtener el mejor rendimiento del mismo. Se comparan los resultados obtenidos por este método con un diseño existente, el cual tiene 6966 transferencias y un tiempo total de viaje de 1,578,830 minutos y se redujo a 5508 transferencias que representa una reducción de 20.9 % y un tiempo total de viaje de 1,220,128 minutos que representa un 22.7 % de reducción. Esto es equivalente a una reducción de 16.5 minutos por usuario.

Este trabajo resuelve de manera simultánea el diseño de la red y el establecimiento de la frecuencia para un solo periodo, dentro de los trabajos a futuro que tienen los autores se encuentra incorporar las tablas de tiempo y expandirlo a multiperiodo. En FTT se integra la frecuencia mínima de paso y la creación de las tablas de tiempo, los objetivos son diferentes a los propuestos por Szeto & Wu y FTT es considerado como multiperiodo.

En la Tabla C.1 del Apéndice C se presentan algunos trabajos previos más relevantes dónde se ha abordado el problema de planeación del transporte urbano. La tabla incluye el autor, el año de publicación, el tema principal, los objetivos que se considera en cada trabajo, así como el método utilizado para dar solución al problema planteado en cada uno de ellos.

## 2.7 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 2

FTT es un problema de decisión complejo en el que intervienen intereses de diversos actores sociales. Más adelante en este trabajo se desarrolla un MIP por lo que se incluye en este marco teórico una sección en la que se exponen los fundamentos básicos de programación entera.

En el modelo desarrollado se incluyen objetivos de diversos actores sociales, por ello el modelo que se presenta en el Capítulo 3 es un modelo de optimización multiobjetivo. Al respecto se presenta en la Sección 2.2 una breve introducción a la

optimización multiobjetivo.

El modelo al que se hizo referencia en el párrafo anterior es resuelto mediante el uso de metaheurísticos multiobjetivo: MOTS y SSPMO. Por tal motivo, se incluye la teoría básica de optimización con metaheurísticas.

La intención de este trabajo es aportar una metodología de apoyo a la decisión, por lo tanto se incluye teoría básica de la decisión multicriterio. Las etapas de la teoría del transporte urbano, como se puede apreciar en este capítulo están relacionadas entre sí y cada una de ellas requiere retroalimentación de la etapa anterior, convirtiendo al problema de planeación del transporte en un problema complejo.

En el estudio del estado del arte realizado, notamos que existen muchos trabajos relacionados al proceso de transporte urbano los cuales han sido abordados con diferentes heurísticos y considerando varias características del problema. Sin embargo, no se encontró ningún trabajo en la literatura revisada que resuelva de manera integrada el establecimiento de la frecuencia mínima de paso y la creación de tablas de tiempo, como se hace con FTT.

## CAPÍTULO 3

# FORMULACIÓN DE FTT

---

En la Sección 3.1 de este capítulo se describe FTT de una manera detallada. Posteriormente, se describe la estructura del problema y los parámetros que son necesarios para la resolución del mismo, así como los retos que se imponen en esta investigación.

Después, en la Sección 3.2 se presentan los supuestos del problema y en seguida, en la Sección 3.3 primeramente se describe de manera general las características más importantes del modelo aquí propuesto, en esta misma sección se presentan los conjuntos, variables y parámetros, así como el modelo completo y una descripción detallada del mismo. Finalmente, se encuentran las conclusiones del capítulo en la Sección 3.4.

### 3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema de planeación de transporte se conforma de los siguientes subproblemas [16]: diseño de la red, frecuencia mínima de paso, tablas de tiempo, asignación de vehículos y asignación de operadores. En este trabajo se consideran dos subproblemas del problema de planeación del transporte urbano de manera integrada: el cálculo de las frecuencias mínimas de paso y la confección de tablas de tiempo.

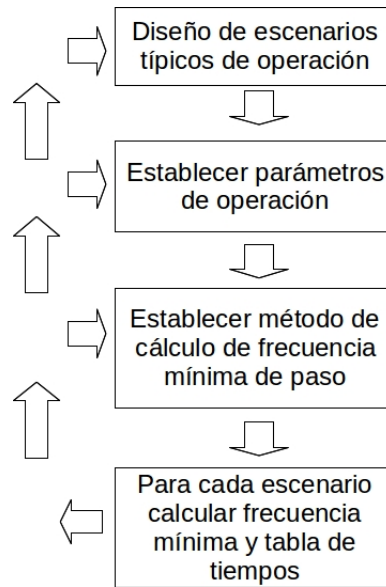


Figura 3.1: Proceso de planeación de frecuencia mínima y tabla de tiempos (integrado).

En el proceso de planeación de estos dos subproblemas (ver Figura 3.1), primero es necesario diseñar el escenario de operación para el cual se desea hacer la planeación, es decir, se necesita definir si la planeación será para un día hábil donde se tiene un flujo de pasajeros en promedio constante, fin de semana donde el flujo es menor y se tienen identificadas las horas de mayor afluencia, periodo pico (mañana o tarde), periodo valle, etc. Una vez que se ha diseñado el escenario se establecen los parámetros de operación como: costos, velocidad comercial, tiempos de cabecera entre otros. Posteriormente, se selecciona que método de frecuencia se aplica en cada periodo de tiempo y es ahora cuando se calcula la frecuencia mínima de paso que cubrirá la demanda y se crea la tabla de tiempos.

Es importante manejar estos dos problemas de manera integrada ya que si no se realiza un buen cálculo de las frecuencias, el planificador al llegar a la etapa de creación de la tabla de tiempos hace una serie de modificaciones de acuerdo a su experiencia, mismos que pueden provocar consecuencias en la planificación de las etapas siguientes a esta, lo que puede llevar a planificaciones suboptimales.

Para las agencias de transporte y los pasajeros la sincronización entre dos rutas es importante, ya que para los pasajeros cuándo existe sincronización les permite minimizar tiempos de viaje y espera y para las agencias al lograr sincronizaciones permite brindar un servicio de calidad a los usuarios.

A lo largo de la literatura revisada se han encontrado una gran cantidad de trabajos que manejan un solo objetivo en cada una de las etapas del interés del autor [12, 23, 5, 18, 38, 31]. Son escasos los trabajos encontrados donde los autores incorporan a sus propuestas diferentes objetivos [37]. La modelación multiobjetivo tiene sus raíces en la necesidad de incorporar en los modelos objetivos de los diferentes actores sociales que son impactados por el proceso, como los son los usuarios quienes buscan mayor comodidad durante su viaje, un tiempo mínimo de recorrido y una tarifa baja. También, podemos encontrar a la agencia de transportes que buscan minimizar sus costos, atender la demanda y brindar un servicio de calidad. Por último, otro actor social que participa en este proceso es el gobierno que espera que las agencias de transporte brinden una mayor movilidad a la ciudadanía que utiliza el transporte público además de velar por el medio ambiente, cuidando que las unidades de las agencias de transporte no contaminen. Un reto en la modelación de FTT es precisamente incorporar objetivos que representen a todos los actores sociales involucrados en el problema.

Otro reto al que se enfrenta un planificador es el de realizar la programación para diferentes periodos de tiempo con demandas distintas. Esto es la carga de pasajeros es variable de un periodo a otro, incluso dentro de un mismo periodo de tiempo. Es por eso que se considera el problema de la transición entre periodos con demandas diferentes, ya que al realizar la tabla de tiempos para un periodo con demanda baja (periodo valle) se requiere una cierta cantidad de vehículos y de operadores que trabajan para cumplir una frecuencia determinada. Sin embargo, cuando se cambia del periodo valle a un periodo con demanda alta (periodo pico) la cantidad de vehículos, operadores y la frecuencia también deben de aumentar. Ceder [11] presenta varios métodos para realizar la planificación manual de múltiples

periodos con una transición suave entre periodos, en esta tesis esos métodos son transformados o adaptados para incorporarlos en un modelo matemático que se emplea para la planificación con soporte computacional automatizado.

Recientemente Ibarra-Rojas & Ríos-Solís [28] demostraron formalmente que el problema de la confección de tablas de tiempos con sincronización resulta ser NP-difícil, por lo que otro reto que se impone en la solución de FTT, es el desarrollo de algoritmos eficientes para el cálculo de soluciones del mismo.

Una solución para FTT consiste en obtener la cantidad de viajes y los instantes de salida de cada uno de ellos para cada ruta en cada periodo. Esta solución debe tener el mayor número de sincronizaciones al menor costo, el menor tiempo de transferencia y la mejor transición entre periodos. Al tener en el problema cuatro objetivos y una gran cantidad de variables hace que la obtención de soluciones a este problema sea un proceso complejo. Al resolver FTT, se ayuda al planificador con la determinación de las frecuencias mínimas de paso y tablas de tiempo. Con FTT se obtiene un conjunto de soluciones a partir del cual el tomador de decisiones selecciona la más conveniente en base a su experiencia y preferencias.

En resumen, el problema abordado en esta investigación puede formularse como: desarrollar un modelo matemático para realizar el cálculo de forma integrada de las frecuencias mínimas de paso y las tablas de tiempo para la planificación de la operación de una empresa de transporte urbano. Considerando múltiples periodos con demanda diferente, múltiples objetivos derivados de los requerimientos de los actores sociales involucrados; entre los que se encuentra la sincronización de rutas en determinados tramos, desarrollar e implementar algoritmos eficientes de solución que exploten la estructura del problema.



## 3.2 SUPUESTOS DEL PROBLEMA

A continuación se exponen los supuestos para el problema presentado en esta investigación:

1. No está permitido el aglomeramiento en los nodos de sincronización (tiempo de espera mínimo es mayor a 0). Debido a que muchas rutas comparten un mismo tramo, se decide que el tiempo mínimo de espera para la sincronización sea mayor a 0.
2. Los tiempos de cabecera y las ventanas de tiempo para la sincronización son determinados por el planeador. Suponemos que estos tiempos son conocidos por el planeador.
3. La demanda no varía significativamente en cada periodo y es conocida (puede ser aproximada por un valor determinista de forma satisfactoria). En este trabajo suponemos conocer la demanda, pues de lo contrario se tendría que incorporar información estocástica de la demanda y flujo de pasajeros.
4. El tiempo promedio de recorrido de cada tramo en cada periodo es conocido. Lo suponemos conocido para facilitar el cálculo de los tiempos de viaje de un tramo origen al tramo destino de la sincronización.
5. La duración del periodo de planeación debe resultar suficiente para programar las salidas. Si el tiempo no es suficiente para programar todos los viajes, nunca se podría llegar a una solución factible.
6. Los requerimientos de planeación deben ser tales que garanticen la satisfacción de la demanda durante el periodo de planeación establecido.
7. Los puntos de sincronización son fijados por el planeador. Solo son tomados en cuenta los viajes que inician dentro del periodo al cual este pertenece. Suponemos que el planificador conoce los puntos donde se desea realizar la

sincronización en base con su experiencia. Para este trabajo solo se consideran sincronizaciones con viajes que salen dentro del mismo periodo, para permitir sincronizaciones con viajes que salen en periodos diferentes sería necesario realizar ciertas modificaciones al presente trabajo.

### 3.3 MODELO LINEAL ENTERO MIXTO

En el modelo que se propone en este trabajo no se conoce la cantidad de viajes que se genererán, así, que los viajes son representados con una variable binaria para indicar la existencia de un viaje. Así, la variable  $X_{ip}^v$  es 1 si existe un viaje en la ruta  $i$  con salida en el tiempo  $p$  dentro del periodo  $v$ .

Otro aspecto que se representa son las sincronizaciones. Esto se realiza con una variable  $Y_{ijkupq}^v$  que indica la existencia de sincronización (valor 1) si el autobús de la ruta  $i$  con tiempo de salida  $p$  y el autobús de la ruta  $j$  con tiempo de salida  $q$  en el periodo  $v$ , llegan al tramo  $k - u$  (punto de sincronización predeterminado) dentro de la ventana de tiempo dada. Además de las sincronizaciones se toman otras funciones objetivo típicas de la literatura como costo, tiempo de transbordo y transición entre periodos. Para poder saber si el resultado obtenido da una buena transición entre periodos, es necesario comparar la tabla de tiempos obtenida con el método propuesto en este trabajo con la tabla de tiempos de cargas promedio propuesta por Ceder [11].

Otros aspectos considerados en este modelo son la satisfacción de la demanda, la determinación de la cantidad de viajes (frecuencia) utilizando los métodos presentados en el Capítulo 2 propuestos por Ceder [11], el cumplimiento de los tiempos de cabecera, la sincronización entre dos rutas que salen en el mismo periodo.

### 3.3.1 EL MODELO

#### Conjuntos:

$M$ : Conjunto de rutas.

$K$ : Conjuntos de tramos.

$V$ : Conjunto de periodos.

$B_{ij}^v$ : Conjunto de pares de tramos en los que potencialmente se sincronizan las rutas  $i$  y  $j$ .

$J(i)$ : Conjunto de rutas que tienen tramos en común con la ruta  $i$ .

#### Variables:

$X_{ip}^v = 1$  si existe viaje en la ruta  $i$  con tiempo de salida  $p$  en el periodo  $v$  y 0 en otro caso.

$Y_{ijkupq}^v = 1$  si el autobús de la ruta  $i$  con tiempo de salida  $p$  y el autobús de la ruta  $j$  con tiempo de salida  $q$  en el periodo  $v$ , llegan al tramo  $k - u$  (punto de sincronización predeterminado) dentro de la ventana de tiempo dada y 0 en otro caso.

$\mu_{ip}^v$ : Representa la diferencia absoluta respecto a la salida más cercana programada por el método de cargas promedio si existe un viaje en la ruta  $i$  al tiempo  $p$  en el periodo  $v$ .

$Z_{ijkv}^v$ : la diferencia entre el tiempo de llegada de las rutas  $i$  y  $j$  en los tramos  $k-u$  en el periodo  $v$ .

#### Parámetros

$P_{\max_i}^v$ : Máxima carga de pasajeros a bordo en la ruta  $i$  en el periodo  $v$ .

$P_{\max d_i}$ : Máxima carga de pasajeros a bordo en el día en la ruta  $i$ .

$d_i^v$ : Ocupación deseada del autobús de la ruta  $i$  en el periodo  $v$ .

$Pas_i^v$ : Cantidad total de pasajeros/km en la ruta  $i$  en el periodo  $v$ .

$L_i$ : Longitud de la ruta  $i$ .

$cap_i^v$ : Capacidad del autobús de la ruta  $i$  en el periodo  $v$ .

$l_k$  : Longitud del tramo  $k$ .

$\beta_i^v$  : Porción permitida de la ruta  $i$  de exceder la carga en el periodo  $v$ .

$H_{max_i}^v$  : Tiempo de cabecera máximo (en minutos) para la ruta  $i$  en el periodo  $v$ .

$H_{min_i}^v$  : Tiempo de cabecera mínimo (en minutos) para la ruta  $i$  en el periodo  $v$ .

$T^v$  : Periodo de planeación (en minutos);  $[T_{ini}^v, T_{fin}^v]$ .

$T_{ini}^v$  : Tiempo (en minutos) en que inicia el periodo de planeación en el periodo  $v$ .

$T_{fin}^v$  : Tiempo (en minutos) en que termina el periodo de planeación en el periodo  $v$ .

$\gamma_i^v$  : Tiempo (en minutos) deseado antes del fin de  $T^v$  para la última salida de la ruta  $i$  en el periodo  $v$ .

$W_{máx_i}^v$  : Tiempo (en minutos) máximo de espera de la ruta  $i$  en el periodo  $v$ .

$W_{mín_i}^v$  : Tiempo (en minutos) mínimo de espera de la ruta  $i$  en el periodo  $v$ .

$t_{ik}^v$  : Tiempo (en minutos) de viaje desde el punto de origen en la ruta  $i$  al tramo  $k$  en el periodo  $v$ .

$\delta_{ijk}^v$  : Cantidad mínima de tiempo (en minutos) que un pasajero necesita para cambiar del tramo  $k$  de la ruta  $i$  al tramo  $u$  de la ruta  $j$  en el periodo  $v$ .

$\theta_i^v(t)$  : Tiempo (en minutos) de la salida más cercana a la tabla de tiempos de carga promedio a  $t$  en la ruta  $i$  en el periodo  $v$ .

$\pi_{ijk}^v$  : Número de pasajeros que cambian del tramo  $k$  de la ruta  $i$  al tramo  $u$  de la ruta  $j$ .

$\overline{P}_{máx_i}^v$  : Promedio de máxima carga de pasajeros a bordo de la ruta  $i$  en el periodo  $v$ .

$MC^v$  : Método que se aplica para determinar la frecuencia en el periodo  $v$ .

$f_{mr_i}^v$  : Frecuencia mínima requerida para satisfacer la demanda de la ruta  $i$  en el periodo  $v$   $f_{mr_i}^v = \frac{\overline{P}_{máx_i}^v}{d_i^v}$ .

$C_{ip}^v$  : Hora calculada mediante el método de cargas promedio del capítulo anterior. 1 si hay salida en el instante  $p$  para la ruta  $i$  en el periodo  $v$ .

$CostoFijo_i^v$  : Costo fijo para la ruta  $i$  en el periodo  $v$ .

$CostoVariable_i^v$  : Costo variable para la ruta  $i$  en el periodo  $v$ .

$P_k^v$  : Promedio de pasajeros abordo en el tramo  $k$  en el periodo  $v$ .

$s_{jk}^v$  : Tiempo (en minutos) que dura un autobús de la ruta  $j$  en el tramo  $k$  durante

el periodo  $v$ .

### Funciones Objetivo

$$\min \sum_{i \in M} \sum_{v \in V} (CostoFijo_i^v + CostoVariable_i^v \cdot L_i \cdot \sum_{p \in T^v} X_{ip}^v) \quad (3.1)$$

$$\max \sum_{i \in M} \sum_{j \in J(i)} \sum_{(k,u) \in B_{ij}^v} \sum_{v \in V} \sum_{p \in T^v} \sum_{q \in T^v} Y_{ijkupq}^v \quad (3.2)$$

$$\min \sum_{i \in M} \sum_{j \in J(i)} \sum_{v \in V} \sum_{(k,u) \in B_{ij}^v} \pi_{ijk u}^v \cdot Z_{ijk u}^v \quad (3.3)$$

$$\min \sum_{v \in V} \sum_{i \in M} \sum_{p \in T^v} \mu_{ip}^v \quad (3.4)$$

sujeto a las restricciones.

$$\begin{aligned} MC^v &== 1 \Rightarrow \\ \sum_{p \in T^v} X_{ip}^v &\geq \frac{P_{maxd_i}}{d_i^v}; v \in V; i \in M \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} MC^v &== 2 \Rightarrow \\ \sum_{p \in T^v} X_{ip}^v &\geq \frac{P_{\max_i}^v}{d_i^v}; v \in V; i \in M \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} MC^v &== 3 \Rightarrow \\ \sum_{p \in T^v} X_{ip}^v &\geq \frac{Pas_i^v}{d_i^v \cdot L_i} \&\& \end{aligned}$$

$$\sum_{p \in T^v} X_{ip}^v \geq \frac{P_{\max_i}^v}{cap_i^v} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} MC^v &= 4 \Rightarrow \\ \sum_{p \in T^v} X_{ip}^v &\geq \frac{Pas_i^v}{d_i^v \cdot L_i} \& \\ \sum_{p \in T^v} X_{ip}^v &\geq \frac{P_{\max_i}^v}{cap_i^v} \& \\ \sum_{k \in I^v} l_k &\leq \beta_i^v \cdot L_i; \\ v \in V; i \in M; I^v &= \{k | \frac{P_k^v}{f_{mr_i}^v} \geq d_i^v\} \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\sum_{p \in T^v} X_{ip}^v \geq f_{mr_i}^v; v \in V; i \in M \quad (3.9)$$

$$\theta_i^v(t) = \begin{cases} r & \text{si } r, h \in T^v \wedge C_{ir}^v = C_{ih}^v = 1 \wedge r \leq t \leq h \wedge |t - r| \leq |t - h| \\ h & \text{si } r, h \in T^v \wedge C_{ir}^v = C_{ih}^v = 1 \wedge r \leq t \leq h \wedge |t - h| < |t - r| \\ \lambda & \text{si } \lambda = \max\{l | C_{il}^v = 1 \wedge l \in T^v\} \wedge \lambda \leq t \\ g & \text{si } g = \min\{l | C_{il}^v \wedge l \in T^v\} \wedge t \leq g \end{cases} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} p &= \min\{l | X_{il}^v = 1 \wedge l \in T^v\} \wedge 0 < \theta_i^v(p) \leq T_{ini}^v + H_{max_i}^v \Rightarrow \\ p &= \theta_i^v(p) \wedge X_{ip}^v = 1 \wedge \mu_{ip}^v = 0; v \in V \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} p &= \min\{l | X_{il}^v = 1 \wedge l \in T^v\} \wedge T_{ini}^v + H_{\max_i}^v < \theta_i^v(p) \Rightarrow \\ X_{ip}^v \cdot p &\leq T_{ini}^v + H_{\max}^v \wedge \mu_{ip}^v = \theta_i^v(p) - p; v \in V \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned}
X_{ih}^v &= 1 \wedge p = \min\{l | X_{il}^v = 1 \wedge l > h \wedge l \in T^v\} \wedge \\
X_{ih}^v \cdot h + H_{\min_i}^v &\leq \theta_i^v(p) \leq X_{ih}^v \cdot h + H_{\max_i}^v \Rightarrow \\
p &= \theta_i^v(p) \wedge X_{ip}^v = 1 \wedge \mu_{ip}^v = 0; v \in V, h \in T^v
\end{aligned} \tag{3.13}$$

$$\begin{aligned}
X_{ih}^v &= 1 \wedge p = \min\{l | X_{il}^v = 1 \wedge l > h \wedge l \in T^v\} \wedge \\
X_{ih}^v \cdot h + H_{\max_i}^v &\leq \theta_i^v(p) \Rightarrow \\
H_{\min_i}^v &\leq X_{ip}^v \cdot p - X_{ih}^v \cdot h \leq H_{\max_i}^v \wedge \\
\mu_{ip}^v &= \theta_i^v(p) - p; v \in V, h \in T^v
\end{aligned} \tag{3.14}$$

$$\begin{aligned}
X_{ih}^v &= 1 \wedge p = \min\{l | X_{il}^v = 1 \wedge l > h \wedge l \in T^v\} \wedge \\
\theta_i^v(p) &\leq X_{ih}^v \cdot h + H_{\min_i}^v \Rightarrow \\
H_{\min_i}^v &\leq X_{ip}^v \cdot p - X_{ih}^v \cdot h \leq H_{\max_i}^v \wedge \\
\mu_{ip}^v &= p - \theta_i^v(p); v \in V, h \in T^v
\end{aligned} \tag{3.15}$$

$$\begin{aligned}
p &= \max\{l | X_{il}^v = 1 \wedge l \in T^v\} \wedge T_{fin}^v - \gamma_i^v \leq \theta_i^v(p) \leq T_{fin}^v \Rightarrow \\
X_{ip}^v &= 1 \wedge p = \theta_i^v(p) \wedge \mu_{ip}^v = 0
\end{aligned} \tag{3.16}$$

$$\begin{aligned}
p &= \max\{l | X_{il}^v = 1 \wedge l \in T^v\} \wedge \theta_i^v(p) < T_{fin}^v - \gamma_i^v \Rightarrow \\
T_{fin}^v - \gamma_i^v &\leq X_{ip}^v \cdot p \leq T_{fin}^v \wedge \mu_{ip}^v = p - \theta_i^v(p)
\end{aligned} \tag{3.17}$$

$$Y_{ijkupq}^v = 1 \Rightarrow$$

$$\begin{aligned}
& X_{ip}^v = 1 \ \& \ X_{jq}^v = 1 \ \wedge \ W_{\min_i}^v - t_{ju}^v - s_{jk}^v + p + t_{ik}^v + \delta_{ijk}^v \leq q \ \wedge \\
& q \leq W_{\max_i}^v - t_{ju}^v - s_{jk}^v + p + t_{ik}^v + \delta_{ijk}^v \ \wedge \ q + t_{ju}^v + s_{jk}^v \geq p + t_{ik}^v + \delta_{ijk}^v; \\
& v \in V; i \in M; (k, u) \in B_{ij}^v; j \in J(i); p, q \in T^v \quad (3.18)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& Y_{ijkupq}^v = 0 \Rightarrow (X_{ip}^v = 0 \parallel X_{jq}^v = 0 \parallel \\
& q \leq W_{\min_i}^v - t_{ju}^v - s_{jk}^v + p + t_{ik}^v + \delta_{ijk}^v \parallel \\
& W_{\max_i}^v - t_{ju}^v - s_{jk}^v + p + t_{ik}^v + \delta_{ijk}^v \leq q \parallel q + t_{ju}^v + s_{jk}^v \geq p + t_{ik}^v + \delta_{ijk}^v); \\
& v \in V; i \in M; (k, u) \in B_{ij}^v; \\
& j \in J(i); p, q \in T^v \quad (3.19)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& Z_{ijk}^v = \min\{(q + t_{ju}^v + s_{jk}^v) - (p + t_{ik}^v + \delta_{ijk}^v) \mid \\
& q + t_{ju}^v + s_{jk}^v \geq p + t_{ik}^v + \delta_{ijk}^v \\
& \wedge Y_{ijkupq}^v = 1 \ \wedge \ p, q \in T^v\}; \\
& i \in M, j \in J(i), v \in V, (k, u) \in B_{ij}^v \quad (3.20)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& Y_{ijkupq}^v = 0 \Leftrightarrow Z_{ijk}^v = 0; \\
& i \in M, j \in J(i), v \in V, (k, u) \in B_{ij}^v, p, q \in T^v \quad (3.21)
\end{aligned}$$

El modelo consta de 4 funciones objetivo, la primera función objetivo (3.1) minimiza el costo. Se consideran el costo fijo y el costo variable, el cual está afectado por la longitud de la ruta y la cantidad de viajes hechos por la ruta en el periodo. La segunda función objetivo (3.2) maximiza el número de sincronizaciones entre 2 rutas en un periodo. La tercera función objetivo (3.3) minimiza los tiempos que a los usuarios les toma cambiar de ruta, es decir los tiempos de transferencia. La cuarta función objetivo (3.4) minimiza la penalidad por no cumplir con la hora calculada por el método de cargas promedios, el cual nos garantiza una buena transición entre periodos con demandas dispares.



Estas funciones objetivo están sujetas a restricciones de frecuencia (3.5 - 3.8), las cuales nos indican la cantidad mínima de viajes que una ruta necesita hacer tomando en cuenta diversos parámetros de carga. El Método I de cálculo de frecuencia (3.5) representa el punto de máxima carga en el día a lo largo de la ruta, el Método II de cálculo de frecuencia (3.6) se basa en la máxima carga observada en cada periodo de tiempo, el Método III de cálculo de frecuencia (3.7) garantiza que el tramo con máxima carga no presentará sobrecarga y el Método IV de cálculo de frecuencia (3.8) establece un nivel de servicio restringiendo una porción del total de la longitud de la ruta con sobrecarga.

En la restricción (3.9) la cantidad de viajes programados deben ser mayor o igual a la frecuencia mínima requerida, la cual satisface al punto de máxima carga, de esta manera se garantiza el cumplimiento de la demanda.

En la definición (3.10) se busca que la salida obtenida con nuestro método esté lo más cerca posible a la salida propuesta por el método de cargas promedio, así la solución propuesta por nuestro método también tendrá una buena transición entre periodos. Se cuenta con cuatro casos:

- Si  $\theta_i^v(t) = r$ , indica que si existen salidas consecutivas obtenidas con el método de cargas promedio en los instantes  $r$  y  $h$  ( $C_{ir}^v = 1$  y  $C_{ih}^v = 1$ , salidas consecutivas), además  $r$  y  $h$  están dentro del periodo de planeación y el tiempo de salida obtenido por FTT ( $t$ ) se encuentra entre  $r$  y  $h$  y la diferencia absoluta de  $t$  con respecto a  $r$  es menor o igual que la diferencia absoluta de  $t$  con respecto a  $h$ .
- Si  $\theta_i^v(t) = h$ , significa que si existen salidas consecutivas con el método de cargas promedio en los instantes  $r$  y  $h$  ( $C_{ir}^v = 1$  y  $C_{ih}^v = 1$ , salidas consecutivas), además  $r$  y  $h$  están dentro del periodo de planeación y el tiempo de salida obtenido por FTT ( $t$ ) se encuentra entre  $r$  y  $h$  y la diferencia absoluta de  $t$  con respecto a  $h$  es menor que la diferencia de  $t$  con respecto a  $r$ .
- Si  $\theta_i^v(t) = \lambda$ , indica que  $\lambda$  es la última salida obtenida por el método de cargas

promedio dentro del periodo de planeación y  $\lambda$  es menor o igual que el tiempo  $(t)$  obtenido con FTT.

- Si  $\theta_i^v(t) = g$ , significa que  $g$  es la primera salida obtenida por el método de cargas promedio dentro del periodo de planeación y el tiempo  $(t)$  obtenido con FTT es menor o igual que  $g$ .

Las restricciones (3.11) y (3.12) son para la primera salida. En (3.11) se indica que si la hora de salida más cercana al método de cargas promedio es menor o igual al tiempo máximo de cabecera, la penalidad es cero. En caso contrario (3.12) se asigna una penalidad que es la diferencia entre la hora de salida más próxima del método de cargas promedio y la hora de salida calculada por el método aquí propuesto.

Las restricciones (3.13) a la (3.15) son para los viajes siguientes. En la restricción (3.13) si  $\theta_i^v(p)$  se encuentra entre los tiempos mínimo y máximo de cabecera entonces la penalidad es cero, pero si el tiempo máximo de cabecera es menor o igual a  $\theta_i^v(p)$  entonces la penalidad es calculada como la diferencia entre la hora de salida más próxima del método de cargas promedio y la hora calculada por nuestro método (3.14). En la restricción (3.15) si  $\theta_i^v(p)$  es menor o igual que el tiempo mínimo de cabecera entonces la penalidad es la diferencia entre la hora de salida obtenida por nuestro método y  $\theta_i^v(p)$ .

Para la última salida en la restricción (3.16) se indica que si  $\theta_i^v(p)$  está entre el final del periodo menos el tiempo deseado antes del último viaje y el final del periodo entonces la penalidad es cero, pero si (3.17)  $\theta_i^v(p)$  es menor que el tiempo final del periodo menos el tiempo deseado antes del final, entonces la penalidad es la hora calculada por FTT menos la hora del método de cargas promedio.

Las restricciones (3.18-3.19) representan la sincronización. En 3.18 indica que cuando dos autobuses de rutas diferentes llegan a un tramo dentro de la ventana de tiempo y considerando los tiempos de transbordo, el tiempo de permanencia en el tramo y el tiempo de viaje, de ser así  $Y_{ijkupq}^v=1$  en caso contrario (3.19)  $Y_{ijkupq}^v=0$ . Las dos últimas restricciones (3.20) y (3.21) contabilizan los tiempos que los usuarios

esperan, al realizar un transbordo.

### 3.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 3

Se ha demostrado en la literatura revisada que FTT es un problema NP-difícil. Por lo tanto se emplean metodos heurísticos (metaheurísticos, hiperheurísticos, evolutivos, etc.). Los supuestos establecidos para la formulación del modelo matemático de FTT tienen una base racional derivada de las fuentes bibliográficas consultadas y de la experiencia de la autora en el tema. Por lo tanto, no limitan la aplicabilidad del mismo para modelar y resolver problemas reales. La limitación estaría dada por la eficiencia de los métodos de solución que se aplican a las instancias representadas en el modelo.

## CAPÍTULO 4

# METODOLOGÍA PARA FTT

---

En este capítulo se presenta en la Sección 4.1 la metodología de apoyo a la decisión. En la Sección 4.2 se explica como se genera una solución para MOTS y como se crea el vecindario. Posteriormente, en la Sección 4.3 se presenta como se generan los vecinos y como se realiza la combinación de soluciones para SSPMO. En la Sección 4.4 se explica como se aplica Promethee. Finalmente, en la Sección 4.5 se encuentran las conclusiones del capítulo.

## 4.1 METODOLOGÍA DE APOYO A LA DECISIÓN

En la Tabla 4.1 se presentan las tres primeras fases del proceso de toma de decisiones (presentado en el Capítulo 2), indicando la propuesta hecha en cada fase para FTT. Cabe señalar que en este trabajo de investigación la etapa de implementación (IV) no es abordada.

En la fase de inteligencia es cubierta con el modelo propuesto en el Capítulo 3, la fase de diseño abarca la optimización, en el caso específico de FTT, es optimización con metaheurísticos (MOTS y SSPMO). Por último en la fase de selección se utiliza Promethee ya que mediante el ordenamiento de alternativas que brinda, el tomador de decisiones puede seleccionar a la mejor posicionada.

Fase	Acción
I.- Inteligencia	Modelo
II.- Diseño	Optimización
III.- Selección	Promethee

Tabla 4.1: Proceso de toma de decisión.

## 4.2 IMPLEMENTACIÓN DE MOTS

Primero, se desarrolla un programa en el lenguaje OPL (Optimization Programming Lenguaje) que a través del diagrama 2.5 presentado en el Capítulo 2, determina que método de frecuencia utilizar en cada ruta en cada periodo y se calcula la frecuencia correspondiente en base a los perfiles de carga (demanda). Los resultados son leídos por MOTS y en base a esos datos se genera el número de salidas correspondiente.

Después, se genera la tabla de tiempos por el método de cargas promedio presentado en el Capítulo 2 dentro de la Sección 2.6. Esta tabla de tiempos garantiza la transición entre periodos y la solución obtenida con FTT se compara con la tabla de tiempos de carga promedio y lo que se intenta es que la diferencia entre las dos propuestas sea minimizada.

Se crea un conjunto de soluciones iniciales ( $X$ ). Los tiempos de salida producidos por MOTS, son generados de manera aleatoria dentro del intervalo de los tiempos de cabecera de cada ruta en cada periodo, pero son representados con ceros y unos. Por ejemplo, se tiene un arreglo de 60 posiciones para cada periodo de una hora, este arreglo contiene ceros y unos, en la posición dónde se encuentra un uno indica el tiempo de salida del viaje. En la Tabla 4.2 se muestran los instantes de salida para la ruta 1 en el periodo 1. En el minuto 2 y en el minuto 59 existe un viaje.

	0	1	2	...	58	59
P1R1	0	0	1	...	0	1

Tabla 4.2: Arreglo que indica los tiempos de salida en MOTS.

Para generar vecinos se utiliza el siguiente procedimiento:

- La cantidad de soluciones candidatas (vecinos) está determina por la cantidad de rutas y periodos. Por ejemplo en una instancia de tres periodos y dos rutas se tienen seis soluciones candidatas. Como se puede ver en la Figura 4.1, dónde los renglones representan los periodos y las columnas las rutas.

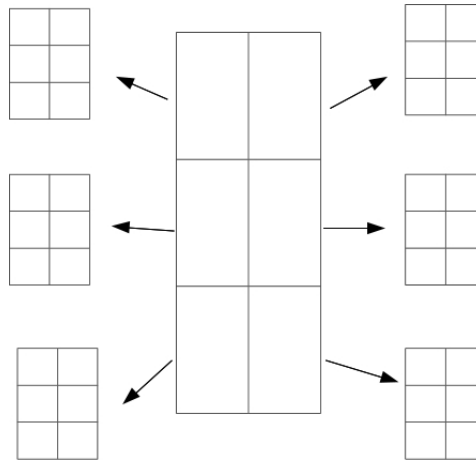


Figura 4.1: Cantidad de soluciones candidatas.

- Para cada ruta en cada periodo, determino aleatoriamente la cantidad de desplazamientos de los instantes de salida (adelanto o atraso) entre -2, -1, 1 y 2. Donde -2 indica atraso de dos minutos, -1 atraso de un minuto, 1 adelanto de un minuto y 2 representa adelanto de dos minutos. Tomemos como ejemplo el arreglo presentado en la Tabla 4.2, si el número aleatorio es -1, se mueve una posición a la izquierda como se muestra en la Tabla 4.3.

	0	1	2	...	58	59
P1R1	0	1	0	...	0	1

Tabla 4.3: Ejemplo de movimientos en el arreglo.

- Ese número aleatorio determinado en el paso anterior, solo aplica a la primera salida y de ser necesario se ajustan los siguientes tiempos de salida para que cumplan con las restricciones de cabecera.
- En seguida, se forma la solución con esa ruta modificada y el resto de la solución original, creando así una solución candidata. Como se puede ver en la Figura 4.2 donde la celda en color rojo representa las salidas para la ruta en el periodo modificadas y las celdas en el color gris indican las salidas originales ( $X$ ).

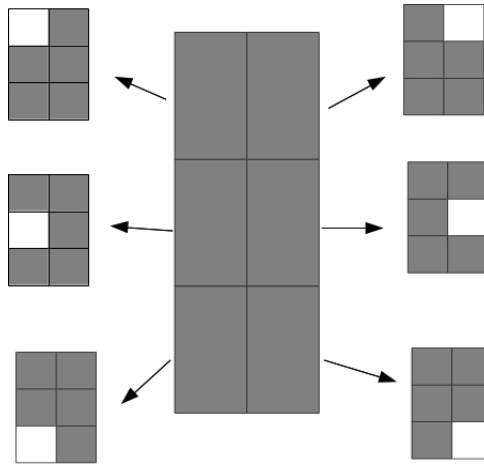


Figura 4.2: Nuevas de soluciones candidatas.

- Se calcula para la solución candidata costo, sincronizaciones, tiempo de transbordo y la transición entre periodos.
- Después de haber generado y evaluado todas las soluciones candidatas, se selecciona la mejor de ellas.

Al cumplirse cierto criterio (en este caso un incremento tipo de una variable contador) se seleccionan aleatoriamente dos soluciones iniciales ( $X$ ) digamos solución  $a$  y solución  $b$  y se hace  $a = b$  y MOTS continúa con su proceso. Esto se hace con la finalidad de explorar la frontera de los no dominados y poder alcanzar soluciones eficientes no soportadas.

### 4.3 IMPLEMENTACIÓN DE SSPMO

Los tiempos de salida para cada viaje son generados aleatoriamente cumpliendo con los tiempos de cabecera de cada ruta en cada periodo. A diferencia de MOTS, aquí se almacena en un arreglo el tiempo de salida de cada viaje. Por ejemplo, supongamos que se tiene el periodo de 6am a 7am y se deben generar 4 viajes para la ruta 1 en el periodo 1. Ver Tabla 4.4 que indica que los viajes salen en el minuto 5, 20, 40 y 55.

P1R1	5	20	40	55
------	---	----	----	----

Tabla 4.4: Arreglo de tiempos de salida.

En SSPMO, para generar vecinos busca seleccionar una ruta en un periodo que cumpla con lo siguiente:

- Aleatoriamente se selecciona un viaje y se incrementa en uno el tiempo de salida de ese viaje.
- Se evalúa para la función objetivo que está siendo evaluada. Recordemos que en SSPMO el problema se resuelve para cada función objetivo.
- Se revisa si esa nueva solución es tabú.
- Se verifica que sea factible. Si lo es, entonces se revisa que sea mejor que el punto actual, si es mejor entonces *punto actual* = *solución vecina*.

Si incrementando el tiempo de salida no se logra generar un vecino, se repite el procedimiento anterior pero ahora decrementado en uno el tiempo de salida. Si con el decremento no logra generar un vecino, entonces va generando una nueva solución para cada ruta en cada periodo, lo evalúa para la función objetivo, verifica que no sea tabú, que sea factible y si es mejor que el punto actual entonces *punto actual* = *solución vecina* y continúa con la ejecución de SSPMO.



Para combinar soluciones se realiza de la siguiente manera:

- Cada solución del conjunto de soluciones de referencia (*RefSet*) se combina con el resto de las soluciones del mismo conjunto generado un número determinado de hijos. Llamemos al par de soluciones de RefSet: solución papá y solución mamá.
- Cada hijo de ese par de soluciones se hace igual a la solución papá.
- Después, para cada ruta en cada periodo se decide aleatoriamente si las salidas de ese hijo en esa ruta y en ese periodo se hacen igual a las salidas de esa ruta y ese periodo de la solución mamá.

En ambos metaheurísticos se desarrollan funciones que calculen el costo, el número de sincronizaciones, el tiempo de transbordo y que determine la penalidad por no cumplir con el método de cargas promedio, siguiendo lo presentado en el modelo de la Sección 3.3.1.

## 4.4 IMPLEMENTACIÓN DE PROMETHEE

Promethee es implementado por la autora de FTT en C++, para lograrlo se requiere determinar qué función utilizar para cada función objetivo. En la Tabla 4.5 se muestran las funciones de preferencia que se han utilizado para cada objetivo y en la Figura 2.3 del Capítulo 2 se puede observar la forma asociada.

Objetivo	Función
Costo	Gaussiano
Sincronizaciones	Criterio-V
Tiempo	Criterio-V
Penalidad	Criterio-V

Tabla 4.5: Funciones para cada objetivo.

Una vez que se define que la función de preferencia con la que se evalúa cada función objetivo, se define el peso, el umbral de preferencia y el umbral de indiferencia.

El objetivo de utilizar Promethee es el de obtener una relación de sobreclasificación que se establece en el conjunto de alternativas [45].

## 4.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 4

Se presenta una metodología de apoyo a la decisión que asiste al tomador de decisiones en las tres primeras fases del proceso de toma de decisiones (inteligencia, diseño y selección) lo que le permite desarrollar un comportamiento racional en el proceso de toma de decisiones, que es la finalidad de todo procedimiento de apoyo a la decisión.

La metodología presentada no debe interpresentarse como algo rígido sino más bien como un marco de trabajo dónde se expone como llevar a cabo el apoyo a la decisión a FTT en las tres primeras etapas del proceso de toma de decisiones. Por ejemplo, en lugar de usar los metaheurísticos aquí propuestos se pueden utilizar otros métodos de optimización multiobjetivo, lo mismo aplica para el método de MCDM que se utiliza en la fase de selección.

En la metodología propuesta no se aborda la fase de implementación, dado que las recomendaciones para esta fase dependen en gran medida de las condiciones concretas de la empresa en la que se aplique la metodología. Sin embargo, algunas acciones generales orientadas al apoyo a la decisión en esta etapa puede ser el desarrollo e implementación de un sistema de apoyo a la decisión, en el cual se implemente la metodología y brindar entrenamiento a los usuarios del sistema así como a los tomadores de decisiones.

## CAPÍTULO 5

# RESULTADOS

---

Para evaluar la eficiencia de los métodos de solución de FTT se utilizaron instancias generadas de manera aleatoria, en la Sección 5.1 se explican las características de las instancias. En la Sección 5.2 se presentan los resultados obtenidos de una prueba de conflictos de criterios. Posteriormente, en la Sección 5.3 se muestran los resultados obtenidos mediante MOTS y SSPMO. Además, debido a la gran cantidad de soluciones eficientes conseguidas, se empleó Promethee para ayudar al tomador de decisiones a encontrar una solución satisfactoria. Después en la Sección 5.4 se muestran los resultados que se obtuvieron al realizar una prueba de sobreclasificación con ambos métodos. Finalmente, en la Sección 5.5 se encuentran las conclusiones del capítulo.

### 5.1 PLANEACIÓN DEL EXPERIMENTO

Se crearon instancias aleatorias clasificadas según la cantidad de periodos, tramos y rutas en pequeñas, medianas y grandes. En relación a la sincronización, se clasificaron las instancias en poco densas, medianamente densas y muy densas basándose en un porcentaje de combinaciones de los tramos de cada ruta. Ver Tabla 5.1. El generador de instancias se desarrolló en OPL. Se generaron un total de 25 instancias tal como se muestra en la Tabla 5.2.

	Pequeñas	Medianas	Grandes
Periodos	3-5	8-10	8-10
Tramos	10-18	19-23	35-50
Rutas	2-4	5-8	8
Densidad	1 %-2 %	2 %-4 %	4 %-7 %

Tabla 5.1: Características de las instancias.

	Pequeñas	Medianas	Grandes
Poco densas	4	3	2
Medianamente densa	4	3	1
Muy densa	4	2	2

Tabla 5.2: Cantidad de instancias generadas para cada tipo.

### Tipo y parámetros del periodo.

#### Periodos valle:

$W_{min}$  (tiempo de espera mínimo) se generó aleatoriamente entre 3 y 13 minutos,  $W_{max}$  (tiempo de espera máximo) entre 25 y 35 minutos, el tiempo en el nodo o tramo entre 3 y 9 minutos, el factor de ocupación es un 35 % de la capacidad del autobús y la demanda para cada tramo de un periodo valle se generó aleatoriamente entre un 35 % y 45 % menos de la ocupación deseada.

#### Periodo pico:

$W_{min}$  (tiempo de espera mínimo) se generó aleatoriamente entre 0 y 10 minutos,  $W_{max}$  (tiempo de espera máximo) entre 13 y 23 minutos, el tiempo en el nodo o tramo entre 9 y 15 minutos, el factor de ocupación es un 90 % de la capacidad del autobús y la demanda para cada tramo de un periodo pico se generó aleatoriamente entre un 30 y 40 % más de la ocupación deseada.

La capacidad del autobús para ambos tipos de periodo es de 70 personas, el costo variable está entre 4 y 15 pesos y el tiempo de salida del último viaje entre

7 y 13 minutos, los tiempos de cabecera pueden variar entre 6 y 10 minutos ó 4 y 12 minutos (según el tipo de periodo), los tiempos de transbordo varían de 5 a 10 minutos.

#### Longitud y tiempo de tramos.

Primero se determinó aleatoriamente si el tramo que se iba a generar es pequeño, mediano o grande y en base a eso se definió el rango en que se genera la longitud y tiempo del tramo. En la Tabla 5.3 se puede observar los rangos que se emplearon en este trabajo.

Tramo	Longitud	Tiempo
Pequeño	1-3 km	5-10 min
Mediano	3-5 km	10-12 min
Grande	5-11 km	12-20 min

Tabla 5.3: Longitudes y tiempos de tramos.

#### Sincronización.

Se compararon todos los pares de tramos de las rutas y aleatoriamente se decide si es o no un tramo de sincronización; si lo es, entonces se genera un número aleatorio que es como una probabilidad para saber si era un punto de sincronización del tipo dónde comparten un tramo común o del tipo dónde solo cruzan por el tramo. La cantidad de tramos de sincronización debe ser igual al número obtenido con el porcentaje de densidad de sincronización.

#### Pasajeros que transbordan.

El número de pasajeros que cambian de una ruta a otra se calcula de manera aleatoria entre la demanda del periodo por el porcentaje de densidad mínimo y la demanda del periodo por el porcentaje de densidad máximo, después esa cantidad de pasajeros se distribuye aleatoriamente entre los tramos de sincronización.

#### Puntos de observación (evaluación).

Se predetermina una cantidad de puntos de observación para cada periodo según sea un periodo pico o valle y también se fija a qué instante del periodo se desea dicho punto de observación. Esto se utiliza para calcular la tabla de tiempos con el método de cargas promedio.

#### Punto ideal.

Se desea conocer la distancia al punto ideal de cada solución obtenida, para saber que tan alejadas o cercanas se encuentran las soluciones de FTT del punto ideal. Para obtener el ideal en cada función objetivo se realiza lo siguiente:

- Costo: Basados en los tiempos de cabecera máximos se calcula la cantidad de viajes mínimos para la solución, esta cantidad de viajes se multiplica por el costo mínimo y así obtenemos el costo ideal.
- Sincronizaciones: En cada una de las instancias tenemos una cantidad de puntos donde se quiere lograr sincronización entre rutas, suponemos que se tiene mínimo una sincronización en cada periodo.
- Tiempo: Una vez obtenida la cantidad de sincronizaciones ideal se multiplica por un promedio de personas que realizan transbordo.
- Penalidad: En todos los casos la penalidad ideal es cero.

## 5.2 PRUEBA DE CONFLICTO DE CRITERIOS

Se seleccionó una instancia y se modificaron las metaheurísticas multiobjetivo para optimizar un único objetivo por corrida. De esta manera se obtuvieron soluciones correspondientes a los valores óptimos de cada objetivo.

En la Tabla 5.4 se muestra en cada fila la solución obtenida tras la optimización de cada objetivo. Los valores óptimos para cada función objetivo se encuentran en la diagonal principal. En las otras columnas por cada fila se presentan los valores

de cada solución en el resto de los objetivos. Como se observa los objetivos están en conflicto. Las soluciones obtenidas con esta prueba se encuentran en el Apéndice D.

	Costo	Sincronización	Tiempo Trans.	Penalidad
Costo	45940.30	105	17910	1
Sincronización	59991.85	184	29127	11
Tiempo Trans.	50347.17	88	12637	0
Penalidad	53017.20	124	19613	0

Tabla 5.4: Soluciones prueba de conflicto de criterios.

### 5.3 RESULTADOS DE LOS MÉTODOS METAHEURÍSTICOS

El método MOTS es una búsqueda tabú multiobjetivo que se desarrolló en OPL; la pantalla en C++ de SSPMO fue ofrecido generosamente por los autores, solo se le hicieron adecuaciones para representar FTT. Ambos métodos se aplicaron a las instancias generadas, ya que se tiene 4 objetivos en la formulación de este problema se obtienen una cantidad considerable de soluciones y la toma de decisiones se convierte en un proceso complicado por lo cual se sometió cada conjunto de soluciones a Promethee.

De las 25 instancias con las que se hicieron pruebas, hemos seleccionado tres de ellas para ejemplificar los resultados y comparar ambos métodos ya que en el resto el comportamiento es similar. Los datos que se presentan en la Tabla 5.5 representan una instancia pequeña y poco densa.

Rutas	3
Periodos	5
Tramos	37
Tiempo de cabecera	9-19, 11-17, 10-18,8-20
No. puntos de sincronización	45
Ventana de espera	10-29, 5-16, 6-33, 10-14,3-29

Tabla 5.5: Datos de instancia pequeña poco densa.

La Tabla 5.6 muestra los datos de una instancia mediana poco densa. Una instancia que consta de 4 rutas, 9 periodos y 88 tramos, también se observa los tiempos de cabecera, la cantidad de puntos de sincronización y las ventanas de espera.

Rutas	4
Periodos	9
Tramos	88
Tiempo de cabecera	6-10,4-12
No. puntos de sincronización	271
Ventana de espera	4-34, 4-18, 10-26, 1-16, 10-29, 2-22, 7-28, 3-15, 5-34

Tabla 5.6: Datos de instancia mediana densa.

La Tabla 5.7 se presenta los datos de una instancia grande medianamente densa. La cual consta de 6 rutas, 10 periodos y 153 tramos, también en esta tabla se puede observar los tiempos de cabecera, el número de puntos de sincronización y las ventanas de espera.



Rutas	6
Periodos	10
Tramos	153
Tiempo de cabecera	6-10,4-12
No. puntos de sincronización	1201
Ventana de espera	7-28, 7-18, 5-28, 4-19, 9-27, 1-21, 10-30, 2-19, 13-29, 8-15

Tabla 5.7: Datos de instancia grande medianamente densa.

### 5.3.1 INSTANCIAS PEQUEÑAS

Se generaron cuatro instancias de cada tipo poco densa, medianamente densa y muy densa; se observó que la densidad no generó un cambio significativo en la comparación de resultados obtenidos por ambos métodos.

Después de resolver la instancia con MOTS, se encontraron 14 soluciones que forman la frontera de Pareto, la mejor solución tiene un costo de 48253.48, 93 sincronizaciones, un tiempo de 13933 y penalidad de 3 de acuerdo a la jerarquización encontrada con Promethee, como se muestra en la Tabla A.1 del Apéndice A.

Con SSPMO se obtuvieron 199 soluciones eficientes, en la Tabla B.1 del Apéndice B solo se presentan las 20 primeras soluciones de acuerdo a Promethee, la solución con costo de 45613.01, 104 sincronizaciones, tiempo 14547 y penalidad 0 es la mejor de ellas de acuerdo a la jerarquización de Promethee.

En la Tabla 5.8 se comparan los porcentajes de los resultados obtenidos con los dos métodos para la instancia pequeña, se puede observar en la Figura 5.1 que la cantidad de viajes, costo, sincronizaciones son muy similares en ambos métodos, la penalidad es mayor en MOTS, sin embargo la diferencia es despreciable.

	No. Viajes	Costo	No. Sinc.	Tiempo	Penalidad
MOTS	0.51	0.51	0.47	0.49	1.00
SSPMO	0.49	0.49	0.53	0.51	0.00

Tabla 5.8: Porcentajes comparativos para instancia pequeña.

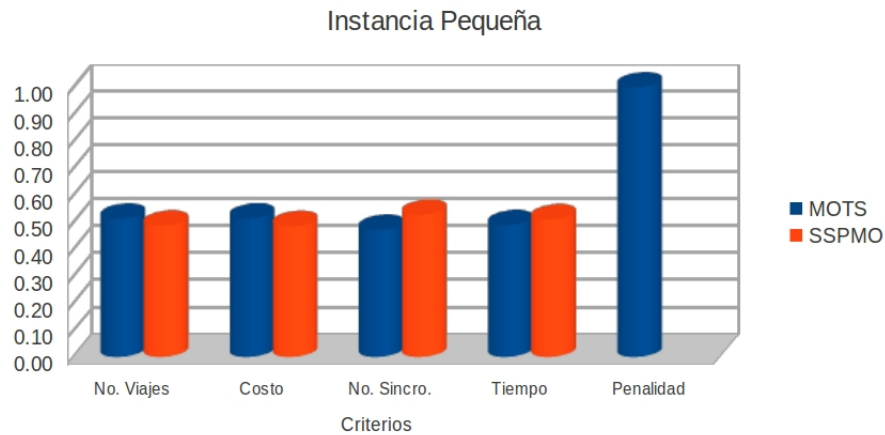


Figura 5.1: Gráfica comparativa para instancia pequeña.

En la Tabla 5.9 se muestran los valores del punto ideal para la instancia pequeña. En la Figura 5.2 se observa la distancia de las mejores soluciones de ambos métodos (soluciones son no dominadas entre sí según Pareto) en costo, sincronizaciones y tiempo de transbordo al punto ideal (centro del gráfico) ambos métodos están cerca del punto ideal, sin embargo, en penalidad MOTS está ubicado a una mayor distancia.

Costo	Sincronizaciones	Tiempo	Penalidad
18470.06	225	6750	0

Tabla 5.9: Punto ideal para instancia pequeña.

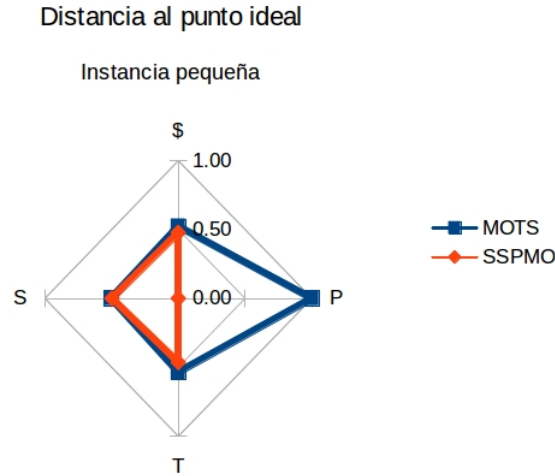


Figura 5.2: Distancia al punto ideal para instancia pequeña.

### 5.3.2 INSTANCIAS MEDIANAS

Para esta instancia se obtuvieron 19 soluciones en MOTS, la mejor tiene un costo de 52717.56, 1265 sincronizaciones, un tiempo de 189139 y una penalidad de 23, de acuerdo a la jerarquización obtenida con Promethee. En la Tabla A.2 del Apéndice A se presentan los resultados.

Con SSPMO se obtuvieron 99 soluciones eficientes, en la Tabla B.2 del Apéndice B se muestran algunas de las soluciones obtenidas, también podemos observar que la mejor de ellas cuenta con un costo de 53625.87, 1507 sincronizaciones, un tiempo de 216810 y penalidad de 207.

En la Tabla 5.10, se observa que en la instancia mediana no existe mucha diferencia entre los valores de las funciones objetivo, de hecho en la Figura 5.3 podemos ver claramente que en la mayoría de los objetivos los dos métodos dan resultados muy similares. Sin embargo, la penalidad que se obtiene con SSPMO para esta instancia es mucho mayor.

	No. Viajes	Costo	No. Sincro.	Tiempo	Penalidad
MOTS	0.49	0.50	0.46	0.47	0.10
SSPMO	0.51	0.50	0.54	0.53	0.90

Tabla 5.10: Porcentajes comparativos para la instancia mediana.

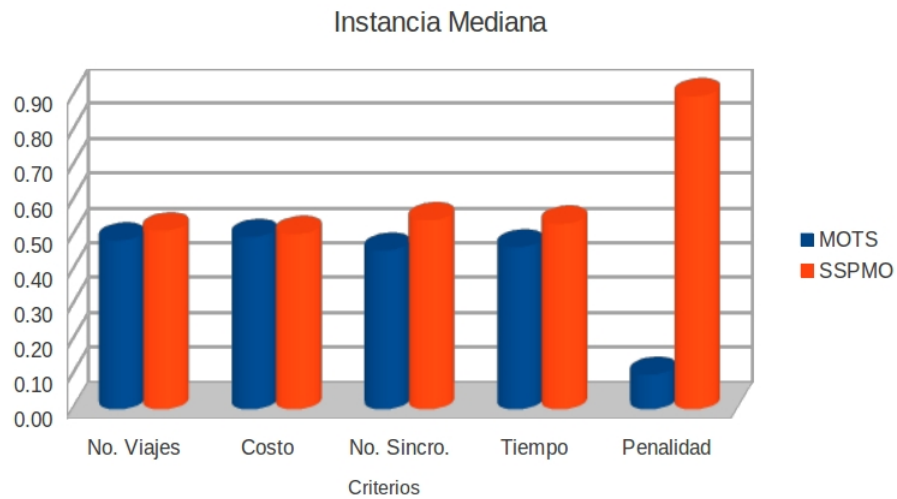


Figura 5.3: Gráfica comparativa para instancia mediana.

El punto ideal para esta instancia es presentado en la Tabla 5.11. Este punto ideal está representado por el centro del gráfico de la Figura 5.4 donde se observa que es justamente la alta penalidad obtenida con SSPMO la que ocasiona que la solución se aleje del punto ideal y el resto de los objetivos se encuentran a una distancia semejante. Estas soluciones son no dominadas entre sí según Pareto.

Costo	Sincronizaciones	Tiempo	Penalidad
112732.51	3645	109350	0

Tabla 5.11: Punto ideal para instancia mediana.

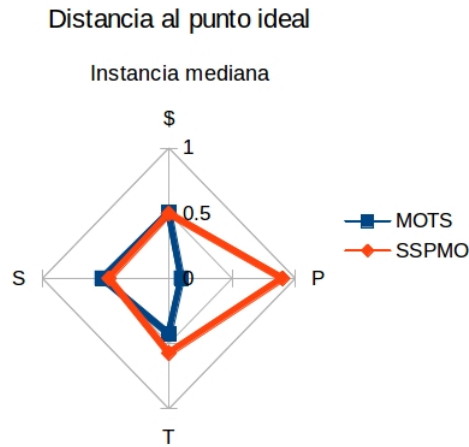


Figura 5.4: Distancia al punto ideal para instancia mediana.

### 5.3.3 INSTANCIAS GRANDES

Los resultados que se pueden observar en la Tabla A.3 del Apéndice A muestran para esta instancia 21 soluciones eficientes con MOTS, siendo la mejor de acuerdo con la jerarquización de Promethee la que tiene un costo de 92416.32, 5667 sincronizaciones, un tiempo de 856020 y una penalidad de 21.

En la instancia grande, se obtuvieron 99 soluciones eficientes que forman parte de la frontera de Pareto, en la Tabla B.3 del Apéndice B se muestran las 20 mejores soluciones que se lograron después de haber conseguido la jerarquización con Promethee, siendo la mejor aquella con un costo de 81718.18, 4983 sincronizaciones, un tiempo de 732845 y penalidad de 34.

Para la instancia grande los valores que se obtienen con los dos métodos son bastante similares lo anterior lo podemos ver en la Tabla 5.12.

	No. Viajes	Costo	No. Sincro.	Tiempo	Penalidad
MOTS	0.52	0.50	0.50	0.50	.68
SSPMO	0.48	0.50	0.50	0.43	.32

Tabla 5.12: Porcentajes comparativos para la instancia grande.

En la Figura 5.5 vemos como SSPMO brinda un menor número de viajes aunque la diferencia es mínima y en penalidad MOTS supera a SSPMO puesto que el valor es mayor en el último mencionado.

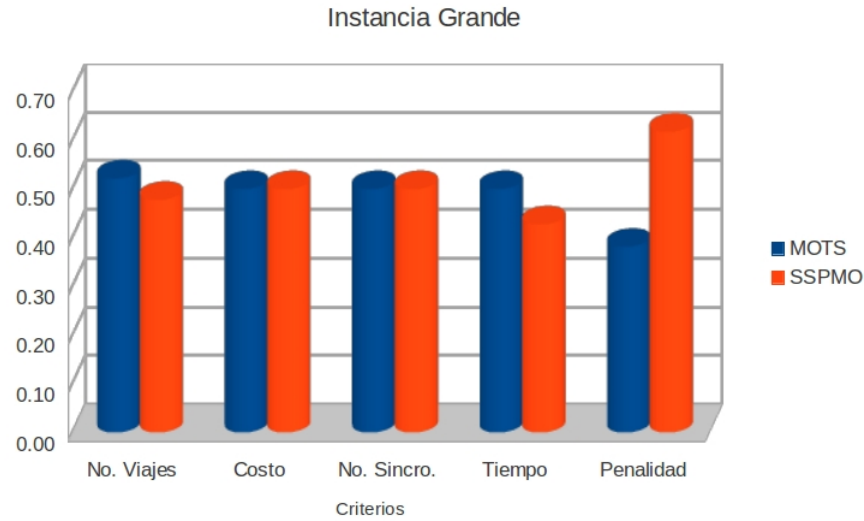


Figura 5.5: Gráfica comparativa para instancia grande.

En relación al punto ideal cuyos valores se pueden observar en la Tabla 5.13 ambos métodos se encuentran en puntos muy semejantes en costo y sincronizaciones. Sin embargo, la diferencia la hacen el tiempo y la penalidad, pues mientras MOTS es débil en tiempo, SSPMO lo es en penalidad. En este caso ambas soluciones (soluciones son no dominadas entre sí según Pareto) pueden ser atractivas para los tomadores de decisiones con diferentes preferencias. Por ejemplo, para el tomador de decisiones que tenga preferencia sobre el tiempo preferirá la solución de SSPMO y quien tenga preferencia sobre la penalidad seleccionará la solución de MOTS. Ver Figura 5.6.

Costo	Sincronizaciones	Tiempo	Penalidad
207057.04	18000	540000	0

Tabla 5.13: Punto ideal para instancia grande.

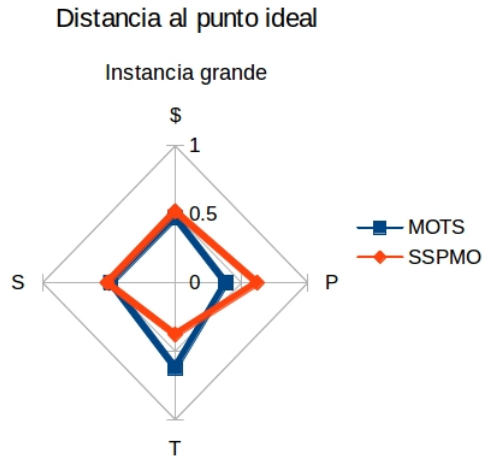


Figura 5.6: Distancia al punto ideal para instancia grande.

En la Tabla 5.14 se presentan los tiempos de ejecución para cada tipo de instancia.

	MOTS	SSPMO
Pequeña	30	84420
Mediana	1320	2704620
Grande	2820	124140

Tabla 5.14: Tiempos de ejecución en segundos.

En la Gráfica 5.7 se observa claramente como los tiempos de SSPMO son muy superiores a los de MOTS.

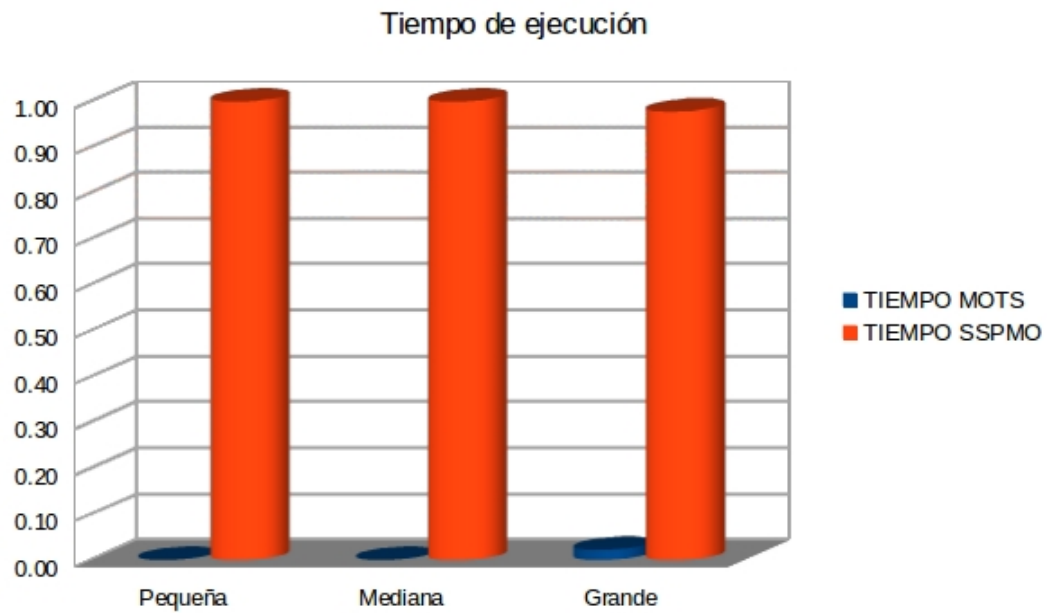


Figura 5.7: Tiempos de ejecución.

En la Tabla 5.15 se exponen un resumen de los resultados que se lograron en cada instancia con cada metaheurístico, así como el tiempo de ejecución.

F.O.	Pequeñas		Medianas		Grandes	
	MOTS	SSPMO	MOTS	SSPMO	MOTS	SSPMO
Costo	.51	.49	.50	.50	.50	.50
Sincr.	.47	.53	.46	.54	.50	.50
T. Trans.	.49	.51	.47	.53	.50	.43
Penalidad	1	0	.10	.90	.68	.32
T. Ej.	30	84420	1320	2704620	2820	124140

Tabla 5.15: Resumen de resultados.



## 5.4 PRUEBA DE SOBRECLASIFICACIÓN

Para establecer los valores de preferencia se simuló un tomador de decisiones. Se considera como umbral de indiferencia el 5% y para el umbral de preferencia el 20% para todos los objetivos. Estos valores son tomados respecto al rango de variación de los valores de los objetivos de las alternativas.

Respecto a los pesos dados en la Tabla 5.16 se consideró que el costo era el objetivo más importante (se le asignó un peso del 50%), las sincronizaciones y la transición entre periodos se le asignó igual importancia (20% a cada una) y el atributo menos importante fue tiempo de transbordo (con un peso del 10%).

	Peso
Costo	.50
Sincronizaciones	.20
Tiempo	.10
Transición	.20

Tabla 5.16: Valores de Promethee.

En la Tabla 5.17 se presentan las comparaciones entre MOTS y SSPMO a partir de la relación de sobreclasificación, entre las soluciones obtenidas por ambos métodos para las tres instancias descritas en secciones previas en este capítulo. Estos resultados se obtuvieron al aplicar Promethee I al conjunto de alternativas, conformado por las soluciones eficientes arrojadas por ambos métodos en una instancia concreta, de esta manera se obtuvo un ordenamiento en el cual, las soluciones que están más arriba son las más preferidas y las que aparecen más abajo son las menos preferidas (según la relación de sobreclasificación).

En cada celda de la Tabla 5.17 se exponen la cantidad de soluciones que sobreclasifican por unos de los dos métodos seguidas por la cantidad total de soluciones eficientes obtenidas por ese método entre paréntesis, después de la diagonal (/) se

presenta la cantidad de soluciones del otro método que son sobreclasificadas seguidas de la cantidad total de soluciones obtenidas por ese método entre paréntesis.

Mientras mayor sea el número de soluciones del primer método que sobreclasifiquen a un mayor número de soluciones del otro método, significa que el primer método arroja soluciones más cercanas al verdadero frente de Pareto. Ejemplo, en la instancia pequeña el valor que aparece en MOTS/SSPMO indica que las 14 soluciones eficientes obtenidas por MOTS 3 sobreclasifican a 46 soluciones eficientes de las 199 obtenidas por SSPMO. En la segunda columna de esa primera fila el resultado se interpreta de 138 soluciones eficientes (de 199 obtenidas por SSPMO) sobreclasifican a todas las soluciones eficientes obtenidas por MOTS. Comparando estos dos resultados, se obtiene que SSPMO arroja para esta instancia 138 soluciones que están más cerca del frente verdadero de Pareto que todas las arrojadas por MOTS incluyendo las 3 que sobreclasifican a 46 soluciones de las 61 restantes.

A partir de los resultados es posible afirmar que SSPMO arroja soluciones de más calidad (respecto a la cercanía del verdadero frente de Pareto) que MOTS. Un razonamiento similar se aplica al resto de las instancias, donde se observa que al menos una solución de SSPMO sobreclasifica a todas las soluciones aportadas por MOTS.

Estas comparaciones aportan un criterio para descartar soluciones eficientes: si una solución eficiente generada por uno de los dos métodos es sobreclasificada por al menos una solución de otro método, entonces debe ser descartada. También sirve esta comparación para elegir un grupo de soluciones que se le presentarán al tomador de decisiones. Por ejemplo, se puede aplicar un criterio de seleccionar las primeras cinco soluciones del ordenamiento de Promethee.

	MOTS/SSPMO	SSPMO/MOTS
Pequeña	3(14)/46(199)	138(199)/14(14)
Mediana	1(19)/89(99)	9(99)/19(19)
Grande	5(21)/3(99)	96(99)/21(21)

Tabla 5.17: Resultados prueba de sobreclasificación.

## 5.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Se diseñó un experimento para la generación de instancias, mismo que arrojó un total de 25 instancias que cubre los escenarios más típicos que se pueden presentar en un problema real.

Se realizó una prueba para verificar que en las instancias generadas los objetivos del modelo se encuentran en conflicto.

Al realizar la comparación empleando una prueba de sobreclasificación de los resultados aportados por los dos métodos metaheurísticos utilizados, se observó que en todas las instancias al menos una de las soluciones aportadas por SSPMO resultó mejor ubicada en el ordenamiento preferencial que todas las soluciones eficientes encontradas por MOTS.

A pesar de que SSPMO aportó siempre soluciones que no eran dominadas por ninguna solución de las aportadas por MOTS, esto lo logró a base de utilizar tiempo computacional considerablemente mayor.

Si las preferencias del tomador de decisiones no son muy sensibles con respecto a pequeñas diferencias en los valores de los objetivos, respecto sus rangos, entonces cualquiera de los dos métodos puede ser utilizado.

Se observó que las variaciones en densidad de sincronizaciones en las instancias no afecta significativamente los resultados obtenidos.

## CAPÍTULO 6

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

En este capítulo se presenta en la Sección 6.1 las conclusiones del presente trabajo, donde se encuentra el tema que se investiga, los criterios que se aplican, así como la metodología que se empleó. Posteriormente, describen las fortalezas y debilidades de la propuesta hecha en esta investigación. En seguida, en la Sección 6.2 se describen las recomendaciones que la autora hace para trabajos futuros similares a este. Después en la Sección 6.3 se explica el trabajo futuro que la autora propone.

## 6.1 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha definido el problema de FTT y por primera vez se ha desarrollado un modelo matemático que recoge características tales como: integración de las frecuencias mínimas de paso y las tablas de tiempo, considerando múltiples periodos y múltiples objetivos con transición entre periodos con demandas diferentes.

Se definí también los límites y el alcance de este modelo mediante el establecimiento de un conjunto de supuestos que condicionan la validez en la aplicación del mismo a situaciones reales.

Se desarrolló una metodología de apoyo a la decisión, para asistir al tomador de decisiones en las tres primeras fases del proceso de toma de decisiones, ayudándole a estructurar el problema, establecer sus preferencias y elegir racionalmente aquellas alternativas que le resulten atractivas. Esta metodología sirve como guía para

implementar un sistema de apoyo a la decisión para resolver FTT.

Los resultados del experimento estadístico realizado sobre un conjunto de instancias generadas semialeatoriamente (controlando ciertas características como: tamaño de la instancia, densidad y demanda) arrojan que SSPMO aporta soluciones de más calidad que MOTS (más cercanas al frente verdadero de Pareto) aunque le toma un tiempo de cómputo considerablemente mayor que MOTS.

### **Fortalezas y debilidades**

Una de las fortalezas de esta propuesta es que integra dos etapas del proceso de transporte urbano frecuencia mínima y tablas de tiempo, de acuerdo a la revisión de bibliografía que se hizo son pocos los trabajos que combinan estas etapas. Además, consideramos beneficios para diversos actores sociales involucrados en el proceso de transporte urbano, otro de las principales fortalezas es que la planeación que se desea obtener es multiperiodo y busca una transición suave entre periodos con demandas dispares.

Pero esta propuesta también tiene algunas debilidades, la primera de ellas es que el tiempo de recorrido y la demanda se consideran conocidos, las sincronizaciones solo ocurren entre viajes del mismo periodo. También, los periodos son solo de una hora y no se cuenta con información de trayectoria, es decir no se considera la cantidad de pasajeros que suben y bajan en cada tramo de la ruta.

## **6.2 RECOMENDACIONES**

Para aplicar la metodología propuesta en esta investigación a un problema real concreto a una empresa de transporte urbano se recomienda:

- Realizar un estudio de cargas de pasajeros usando uno de los métodos propuestos por Ceder [11] para estimar la demanda en escenarios típicos en diferentes periodos del día, identificando periodos pico y periodos valle.

- Extraer de los decisores reales la información de preferencia utilizada en Promethee, ya que de otra forma no se garantiza que los ordenamientos de las soluciones obtenidas satisfagan las expectativas y preferencias de los tomadores de decisiones.
- En el estado actual de la implementación de la metodología se recomienda que sea un analista de la decisión quien lleve a cabo el proceso de apoyo a la decisión y elabore la recomendación, dado que es necesario estar familiarizado con los métodos de optimización y los métodos de MCDM para problemas de decisión bajo certeza.

### 6.3 TRABAJO FUTURO

Para el trabajo futuro existen las siguientes propuestas:

- Incorporar en el modelo el comportamiento estocástico de la demanda, esto acerca más el modelo a las instancias reales donde la demanda es desconocida en general.
- Incorporar información relacionada con las trayectorias de los pasajeros lo que permite tener un control más preciso de la distribución de cargas de pasajeros durante los viajes en los diferentes periodos.
- Permitir la sincronización entre dos viajes con tiempos de salida en periodos distintos.
- Desarrollar métodos heurísticos que resuelvan eficientemente instancias de tamaño real en problemas en los cuales se hayan incorporado las características mencionadas arriba.
- Implementar la metodología de apoyo a la decisión en un sistema de apoyo a la decisión que pueda ser utilizado por personas que no tengan conocimientos en las áreas de investigación de operaciones y toma de decisiones.

Lo anterior se puede ver de forma gráfica en la Figura 6.1. Los cuadros en rosa representa lo ya implementado que no requiere modificaciones, en azul aquello que ya está implementado y requiere modificación y en amarillo lo que aún no ha sido implementado.

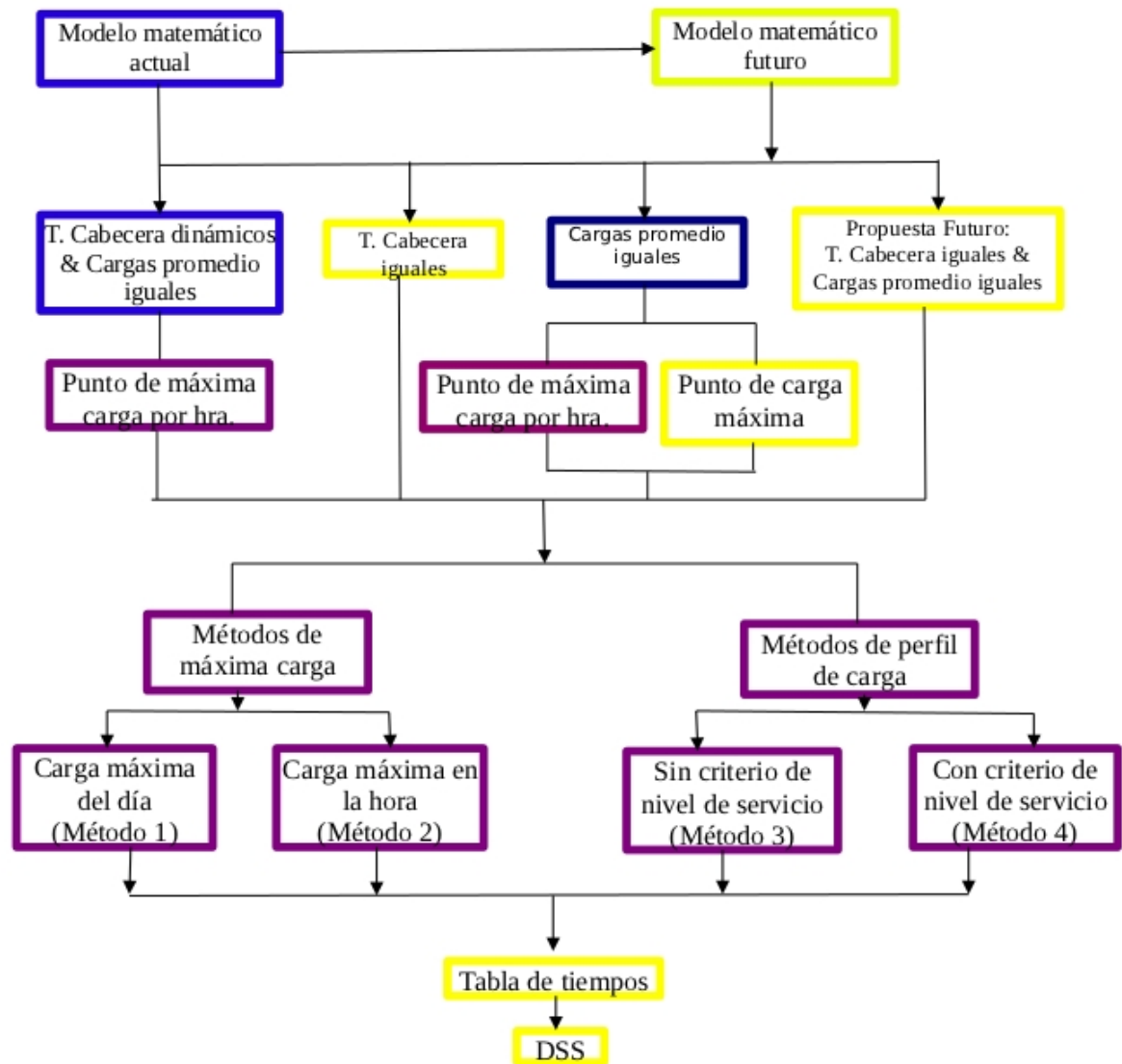


Figura 6.1: Propuesta de trabajo futuro.

## APÉNDICE A

# APÉNDICE: RESULTADOS MOTS

---

Tabla A.1: Soluciones de instancia pequeña poco densa con MOTS que forman la frontera de Pareto.

Costo	Sincronizaciones	Tiempo	Penalidad	Promethee
48253.48	93	13933	3	-0.0886
48253.48	103	15688	15	-0.1257
48253.48	107	16855	15	-0.1274
48253.48	104	16291	9	-0.1284
48253.48	100	15061	24	-0.1329
48253.48	108	16962	35	-0.133
48253.48	108	16962	35	-0.133
48253.48	101	15400	21	-0.1341
48253.48	99	14865	27	-0.1353
48253.48	107	16855	36	-0.1387
48253.48	102	15586	38	-0.1461
48253.48	102	15586	38	-0.1461
48253.48	106	16495	42	-0.1483
48253.48	102	16230	37	-0.1554
48253.48	91	13674	39	-0.1592



Tabla A.2: Soluciones de instancia mediana densa con MOTS que forman la frontera de Pareto.

Costo	No. Sincronizaciones	Tiempo	Penalidad	Promethee
52717.56	1265	189139	23	0.1119
52717.56	1270	190792	33	0.0972
52717.56	1270	190792	33	0.0972
52717.56	1229	182720	14	0.0937
52717.56	1229	182720	14	0.0937
52717.56	1272	188872	41	0.0936
52717.56	1270	188807	49	0.0893
52717.56	1252	187820	37	0.0867
52717.56	1252	189421	29	0.0845
52717.56	1240	182315	39	0.0805
52717.56	1222	183748	24	0.0781
52717.56	1241	183838	38	0.0765
52717.56	1239	181687	52	0.0711
52717.56	1270	188767	73	0.0689
52717.56	1258	188373	58	0.0648
52717.56	1258	188373	58	0.0648
52717.56	1273	189602	82	0.0597
52717.56	1237	181558	69	0.0561
52717.56	1230	180894	58	0.0553

Tabla A.3: Soluciones de instancia grande medianamente densa con MOTS que forman la frontera de Pareto.

Costo	No. Sincronizaciones	Tiempo	Penalidad	Promethee
92416.32	5667	856020	21	-0.1416
92416.32	5667	856020	21	-0.1416
92416.32	5699	850568	33	-0.1419
92416.32	5608	840765	8	-0.1435
92416.32	5628	834633	26	-0.1468
92416.32	5554	831509	17	-0.1525
92416.32	5559	832911	13	-0.1538
92416.32	5698	850349	35	-0.1548
92416.32	5614	841135	24	-0.16
92416.32	5633	838078	36	-0.1712
92416.32	5567	832436	36	-0.1827
92416.32	5635	838344	46	-0.2464
92416.32	5625	834167	47	-0.2553
92416.32	5683	846622	50	-0.2967
92416.32	5571	833009	49	-0.3136
92416.32	5571	833009	49	-0.3136
92416.32	5627	833847	58	-0.372
92416.32	5671	845084	99	-0.4865
92416.32	5702	852624	115	-0.5136
92416.32	5561	831722	100	-0.5137
92416.32	5555	828033	106	-0.5331

## APÉNDICE B

# APÉNDICE: RESULTADOS SSPMO

---

Tabla B.1: Soluciones de instancia pequeña poco densa con SSPMO que forman la frontera de Pareto.

Costo	No. Sincronizaciones	Tiempo	Penalidad	Promethee
45613.02	104	14547	0	0.3109
45613.02	107	15335	0	0.3079
45613.02	106	15159	0	0.3067
45613.02	105	14977	0	0.3057
45328.68	105	15626	0	0.3046
45613.02	102	14477	0	0.3023
45328.68	104	15541	0	0.3017
44887.62	87	12607	0	0.2973
44887.62	89	13279	0	0.2969
45613.02	101	14475	0	0.2967
44887.62	88	13143	0	0.2964
44887.62	86	12423	0	0.296
45328.68	102	15372	0	0.2954
45328.68	101	15115	0	0.295
45328.68	100	15077	0	0.2923
45328.68	98	14820	0	0.2884
46337.35	108	15013	0	0.2782
46495.05	112	16256	0	0.2753
46337.35	107	14913	0	0.274
45510.81	96	14737	0	0.2726

Tabla B.2: Soluciones de instancia mediana densa con SSPMO que forman la frontera de Pareto.

Costo	No. Sincronizaciones	Tiempo	Penalidad	Promethee
53625.87	1507	216810	207	0.1751
52637.79	1500	217220	267	0.1310
53308.41	1403	205524	256	0.1278
52589.54	1405	207249	255	0.1275
52870.48	1395	203055	257	0.1246
52637.79	1501	217182	269	0.1222
52637.79	1500	217039	269	0.1218
52589.54	1390	204081	255	0.1169
52609.17	1383	201555	256	0.1125
53065.54	1418	209198	263	0.1013
51617.17	1335	194510	225	0.0949
53162.78	1430	214336	262	0.0925
51925.57	1356	200415	250	0.0839
51405.14	1330	195819	251	0.0826
50378.97	1292	192268	273	0.0823
52263.86	1384	205478	262	0.0810
52263.86	1386	205852	262	0.0808
51034.40	1300	187681	261	0.0783
52190.19	1408	209459	264	0.0773
53625.87	1508	217099	270	0.0753

Tabla B.3: Soluciones de instancia grande medianamente densa con SSPMO que forman la frontera de Pareto.

Costo	No. Sincronizaciones	Tiempo	Penalidad	Promethee
81718.19	4983	732845	34	0.2411
79922.31	4947	726909	44	0.2371
79922.31	4938	725077	44	0.2345
79922.31	4937	724912	44	0.2335
79796.59	4763	702251	28	0.2244
81605.44	4992	738909	38	0.2193
80757.81	4814	704818	36	0.219
81540.10	4896	721761	36	0.2154
81102.36	4901	726460	39	0.2112
79783.26	4813	712226	41	0.1979
79783.26	4814	712572	41	0.1963
81495.15	4943	730504	42	0.1961
81268.36	4867	728175	33	0.1888
82931.69	5103	749632	35	0.1884
79922.31	4889	716191	47	0.1763
79922.31	4888	716048	47	0.1755
80363.09	4818	713765	41	0.172
80784.37	4866	712449	46	0.1535
80418.80	4981	736018	48	0.1524
83324.88	5172	756183	41	0.1513

## APÉNDICE C

# APÉNDICE: TRABAJOS PREVIOS

---

Tabla C.1: Tabla de trabajos previos.

Autor	Año	Tema principal	Objetivo(s)	Método
Min Kwan y C.S. Chang	2008	Tabla de tiempos	Mín insatisfacción + desviación de tiempos	NSGA2
Fang Zhao y X. Zeng	2007	Diseño de red, Tiempos de cabecera-Tabla de tiempos	Mín costo pasajeros	SA-TS-Greedy
Partha Chakroborty	2003	Diseño de red-Tabla de tiempos (secuenciado)	Mín tiempos transferencia + tiempo de espera	GA
Lang Fan y Christine Mumford	2008	Problema de rutas	Mín tiempo de viaje + número de transferencias	Hill-climbing-SA
Liu, Olszewski y Goh	2010	Diseño de red	Mín costo ( pasajeros y operadores)	SA-GA

Continúa en siguiente página

Autor	Año	Tema principal	Objetivo(s)	Método
Mauttone y Urquhart	2007, 2009, 2010	Diseño de red	Mín tiempos + mín costos, mín tiempo(usuario) + mín route milage (operaciones)	GRASP combin. Con Pair Insertion Alg. RGA y PIA
Moz,Respicio y VazPato	2009	Rostering	Mín tiempos extras y mín número trabajadores con carga de trabajo incompleta	Utopic Genetic heuristic (UGH) y Adapted SPEA2 (ASP)
W.Y. Szeto, Yongzhong Wu	2011	Frecuencia-Diseño de red (simultáneo)	Mín número de transferencias + Tiempo de viaje	GA hybrid
Shangyao Yan, Chin-Jen Chi, Ching-Hui Tang	2005	Tabla de tiempos (demanda estocástica) entre ciudades	Mín flujo de vehículos + costo pasajeros	Link-based heuristic algorithm (LBHA) y Path-based heuristic algorithms (PBHA)

Continúa en siguiente página

Autor	Año	Tema principal	Objetivo(s)	Método
Ralf Borndorfer, Martin Grottschel y Marc Pfetsch	2004	Diseño de red	Mín tiempo de viaje y costos de operación	branch and price algorithm (aún trabajaban en la solución del programa entero)
Wei Fan	2004	Diseño de red	Mín costo de usuarios + costo de operadores + costo de insatisfacción de demanda	GA,LS, SA, Random Search, TS, Exhaustive Search method
André de Palma, Robin Lindsey	2000	Tabla de tiempos	Mín costos por retraso de los viajes	Métodos numéricos
Christian Liebchen	2002	Tabla de tiempos	Mín tiempos de transferencia + tiempo de permanencia	Cut and Branch, Constraint programming, GA
K. Nachtigall	1993	Tabla de tiempos	Mín tiempo de espera	Branch and bound algorithm, GA

Continúa en siguiente página



Autor	Año	Tema principal	Objetivo(s)	Método
Mohaymany and Amiripour	2008	Tabla de tiempos	Mín tiempo de espera	Simulación
Anita Schobel, Susanne Scholl	2006	Diseño de red	Mín tiempo de viaje (incluye penalidades por transbordo)	Dantzing Wolfe decomposition, Branch and price, y heurístico (trabajaban en ello)
Ceder, Golany, Tal	2003, 2001, 2000, 1983, 1986	Tabla de tiempos, frecuencia, Diseño de red. Incluye multiperiodo y transferencia entre periodos	Máx sincronización, mín costo de operación, mín tiempo de pasajeros + mín flota vehicular	Algoritmo heurístico
Barra, Carvalho, Teypaz, Cung, Balassiano	2007	Diseño de red	Modelo de satisfacción de restricciones	Constraint programming
Furth y Wilson	1981	Frecuencia	Máx beneficio social neto	Algoritmo heurístico
M. Hadi Baaj y Hani S. Mahmassani	1994	Diseño de red	Mín costo (pasajeros y operadores)	Hybrid route generation algorithm

Continúa en siguiente página

Autor	Año	Tema principal	Objetivo(s)	Método
Ibarra-Rojas y Ríos-Solís	2011	Tabla de tiempos	Máx sincronización	Multi-start itera- ted local search

## APÉNDICE D

# APÉNDICE: SOLUCIONES PRUEBA DE CRITERIOS

---

Ruta 1 Per 1 salidas 4				
18	31	44	54	
Ruta 1 Per 2 salidas 5				
65	80	91	106	118
Ruta 1 Per 3 salidas 4				
129	145	156	171	
Ruta 1 Per 4 salidas 4				
199	210	227	236	
Ruta 1 Per 5 salidas 3				
258	275	290		
Ruta 2 Per 1 salidas 4				
16	31	42	58	
Ruta 2 Per 2 salidas 4				
73	85	96	112	
Ruta 2 Per 3 salidas 4				
134	152	161	176	
Ruta 2 Per 4 salidas 4				
184	200	215	233	
Ruta 2 Per 5 salidas 4				
257	270	282	294	

Ruta 3 Per 1 salidas 4				
17	33	48	60	
Ruta 3 Per 2 salidas 3				
79	97	113		
Ruta 3 Per 3 salidas 4				
136	148	164	178	
Ruta 3 Per 4 salidas 3				
198	216	230		
Ruta 3 Per 5 salidas 4				
255	269	284	300	
<b>Costo = 45940.30</b>				

Tabla D.1: Solución obtenida para costo.

Ruta 1 Per 1 salidas 4					
17	28	38	55		
Ruta 1 Per 2 salidas 4					
71	87	98	113		
Ruta 1 Per 3 salidas 5					
122	137	148	161	175	
Ruta 1 Per 4 salidas 5					
193	202	211	226	236	
Ruta 1 Per 5 salidas 6					
248	258	268	278	289	300
Ruta 2 Per 1 salidas 5					
0	15	27	38	50	
Ruta 2 Per 2 salidas 5					
69	84	97	109	120	
Ruta 2 Per 3 salidas 5					
122	133	143	159	171	
Ruta 2 Per 4 salidas 5					

181	196	211	229	239	
Ruta 2 Per 5 salidas 5					
242	255	268	279	296	
Ruta 3 Per 1 salidas 5					
6	17	29	43	54	
Ruta 3 Per 2 salidas 5					
79	89	100	109	120	
Ruta 3 Per 3 salidas 5					
124	142	153	164	175	
Ruta 3 Per 4 salidas 4					
192	207	219	234		
Ruta 3 Per 5 salidas 6					
241	252	267	278	289	300
<b>Sincronizaciones = 184</b>					

Tabla D.2: Solución obtenida para sincronizaciones.

Ruta 1 Per 1 salidas 4				
13	32	50	60	
Ruta 1 Per 2 salidas 4				
65	81	98	115	
Ruta 1 Per 3 salidas 4				
138	155	170	180	
Ruta 1 Per 4 salidas 4				
194	207	219	235	
Ruta 1 Per 5 salidas 4				
254	268	284	300	
Ruta 2 Per 1 salidas 4				
15	31	42	55	
Ruta 2 Per 2 salidas 4				
73	84	99	113	

Ruta 2 Per 3 salidas 4				
136	155	163	176	
Ruta 2 Per 4 salidas 5				
181	193	207	220	236
Ruta 2 Per 5 salidas 4				
249	260	273	289	
Ruta 3 Per 1 salidas 4				
6	21	36	53	
Ruta 3 Per 2 salidas 4				
76	92	108	120	
Ruta 3 Per 3 salidas 4				
130	141	157	172	
Ruta 3 Per 4 salidas 4				
193	211	221	236	
Ruta 3 Per 5 salidas 5				
241	254	267	281	292
<b>Tiempo Trans = 12637</b>				

Tabla D.3: Solución obtenida para tiempo de transbordo.

Ruta 1 Per 1 salidas 4					
5	22	40	54		
Ruta 1 Per 2 salidas 5					
65	77	92	105	120	
Ruta 1 Per 3 salidas 5					
124	141	157	170	180	
Ruta 1 Per 4 salidas 6					
186	195	209	219	229	238
Ruta 1 Per 5 salidas 5					
252	261	270	283	297	
Ruta 2 Per 1 salidas 4					

15	30	43	55		
Ruta 2 Per 2 salidas 4					
67	83	98	112		
Ruta 2 Per 3 salidas 4					
139	154	162	177		
Ruta 2 Per 4 salidas 5					
187	199	211	224	239	
Ruta 2 Per 5 salidas 4					
253	267	278	294		
Ruta 3 Per 1 salidas 5					
17	27	37	48	60	
Ruta 3 Per 2 salidas 4					
79	89	100	113		
Ruta 3 Per 3 salidas 4					
126	143	158	170		
Ruta 3 Per 4 salidas 4					
199	215	226	238		
Ruta 3 Per 5 salidas 4					
257	272	286	300		
<b>Penalidad = 0</b>					

Tabla D.4: Solución obtenida para penalidad.

# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] BAAJ, M. y MAHMASSANI, H. S., «Hybrid route generation heuristic algorithm for the design of transit networks», *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **3**(1), págs. 31–50, 1995.
- [2] BARRA, A., CARVALHO, L., TEYPAZ, N., CUNG, V. D. y BALASSIANO, R., «Solving the transit network design problem with constraint programming», en *11th World Conference in Transport Research*, 2007.
- [3] BLUM, C. y ROLI, A., *Hybrid Metaheuristics. An emerging approach to optimization*, Springer, 2008.
- [4] BOHANEC, M., «Decision Support», en D. Mladenic, N. Lavrac, M. Bohanec y S. Moyle (editores), *Data Mining and Decision Support*, tomo 745, Springer US, págs. 23–35, 2003.
- [5] BORNDORFER, R., GROTSCHEL, M. y PFETSCH, M. E., «Models for Line Planning in Public Transport», en *Computer-aided Systems in Public Transport*, tomo 600, Springer Berlin Heidelberg, págs. 363–378, 2008.
- [6] BRANS, J.-P. y MARESCHAL, B., *Multiple criteria decision analysis*, capítulo 5, Kluwer Academic Publishers, 2005.
- [7] BRINGMANN, K. y FRIEDRICH, T., «Approximating the Least Hypervolume Contributor: NP-Hard in General, But Fast in Practice», en *Evolutionary Multi Criterion Optimization*, tomo 5467, Springer Berlin Heidelberg, págs. 6–20, 2009.



- 
- [8] CEDER, A., «Bus frequency determination using passenger count data», *Transportation Research Part A: General*, **18**(5–6), págs. 439–453, 1984.
- [9] CEDER, A., «Methods for creating bus timetables», *Transportation Research Part A: General*, **21**(1), págs. 59–83, 1987.
- [10] CEDER, A., *Designing public transport network and routes*, capítulo 3, Elsevier Science Ltd, 2003.
- [11] CEDER, A., *Public transit planning and operation: theory, modelling and practice*, primera edición, Elsevier, USA, 2007.
- [12] CEDER, A., GOLANY, B. y TAL, O., «Creating bus timetables with maximal synchronization», *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **35**(10), págs. 913–928, 2001.
- [13] CHAKROBORTY, P., «Genetic Algorithms for Optimal Urban Transit Network Design», *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **18**(3), págs. 184–200, 2003.
- [14] CHEN, S., LESTREL, P., KERR, W. y MCCOLL, J., «Describing shape changes in the human mandible using elliptical Fourier functions», *The European Journal of Orthodontics*, **22**(3), págs. 205–216, 2000.
- [15] DE PALMA, A. y LINDSEY, R., «Optimal timetables for public transportation», *Transportation Research Part B*, **35**(1), págs. 789–813, 2001.
- [16] DESAULNIERS, G. y HICKMAN, M. D., «Capitulo 2 Public Transit», en *Transportation*, tomo 14, Elsevier, págs. 69–127, 2007.
- [17] EHRGOTT, M. y GANDIBLEUX, X., «A Survey and Annotated Bibliography of Multiobjective Combinatorial Optimization», *OR Spektrum*, **22**(4), págs. 425–460, 2000.

- 
- [18] ERANKI, A., *A model to create bus timetables to attain maximum synchronization considering waiting times at transfer stops*, Tesis Doctoral, University of South Florida, 2004.
- [19] FAN, L. y MUMFORD, C., «A metaheuristic approach to the urban transit routing problem», *Journal of Heuristics*, **16**(3), págs. 353–372, 2010.
- [20] FÉLIX, L., *Un procedimiento basado en relaciones de sobreclasificación y algoritmos genéticos multiobjetivo para resolver problemas de cartera de proyectos de importancia social*, Tesis Doctoral, Universidad de Cualiacán, 2006.
- [21] FERNÁNDEZ, E., *Application of Multicriteria Optimization to Design and Modelling of Circuits and Components*, Tesis Doctoral, Universidad Tecnológica de Poznan, 1987.
- [22] FOURNIER, S., «Dedicated heuristic for a back and forth single line bus trip timetabling problem», XLII SBPO, 2010.
- [23] FURTH, P. y WILSON, N., «Setting frequencies on bus routes: theory and practice», *Transportation Research Board*, (818), págs. 1–7, 1981.
- [24] GLOVER, F., «Future paths for integer programming and links to artificial intelligence», *Computeres & Operations Research*, **13**, págs. 533–549, 1986.
- [25] GLOVER, F. y MELIÁN, B., «Búsqueda tabú», *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 2003.
- [26] HANSEN, M. P., «Tabu search for multiobjective optimization: MOTS», MCDM Cape Town South Africa, 1997.
- [27] HWANG, C. y MASUD, A., *Multiple objective decision making. Methods and applications: A state of the art survey*, Springer-Verlang, USA, 1979.
- [28] IBARRA-ROJAS, O. J. y RIOS-SOLIS, Y. A., «Synchronization of bus timetable», , 2011.

- 
- [29] JONES, D., MIRRAZAVI, S. y TAMIZ, M., «Multi-objective metaheuristics: An overview of the current state-of-the-art», *European Journal of Operational Research*, **137**(1), págs. 1–9, 2002.
- [30] KWAN, C. M. y CHANG, C., «Timetable synchronization of mass rapid transit system using multiobjective evolutionary approach», *IEEE transactions on systems, man and cybernetics- part C Applications and reviews*, **38**(5), págs. 636–648, 2008.
- [31] LIEBCHEN, C., «Periodic Timetable Optimization in Public Transport», en *Operations Research Proceedings 2006*, tomo 2006, Springer Berlin Heidelberg, págs. 29–36, 2007.
- [32] LIU, L., OLSZEWSKI, P. y GOH, P.-C., «Combined Simulated Annealing and Genetic Algorithm Approach to Bus Network Design», en *Transport Systems Telematics*, tomo 104, Springer Berlin Heidelberg, págs. 335–346, 2011.
- [33] LLANES, L. M. P., *Clasificación multicriterio aplicada a la caracterización de la maduración ósea en niños y adolescentes con oclusión normal y edades entre 9 y 16 años*, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, Febrero 2009.
- [34] LÓPEZ IRARRAGORRI, F., «Toma de decisiones bajo criterios múltiples», Notas de clase, Enero 2011.
- [35] LUNA VALERO, F., *Metaheurísticas avanzadas para problemas reales en redes de telecomunicaciones*, Tesis Doctoral, Universidad de Málaga, 2008.
- [36] MARÍN, A. y JARAMILLO, P., «Urban rapid transit network capacity expansion», *European Journal of Operational Research*, **191**(1), págs. 45–60, 2008.
- [37] MAUTTONE, A. y URQUHART, M., «A multi-objective metaheuristic approach for the Transit Network Design Problem», *Public Transport*, **1**(4), págs. 253–273, 2009.

- [38] MOHAYMANY, A. S. y AMIRIPOUR, S. M., «Creating bus timetables under stochastic demand», *International Journal of Industrial Engineering and Production Research*, **30**(3), págs. 83–91, 2009.
- [39] MOLINA, J., LAGUNA, M., MARTÍ, R. y CABALLERO, R., «SSPMO: A Scatter Tabu Search Procedure for Non-Linear Multiobjective Optimization», *INFORMS Journal on Computing*, 2007.
- [40] MOLINERO MOLINERO, A. y SÁNCHEZ ARELLANO, L. I., *Transporte público: planeación, diseño, operación y administración*, Universidad Autónoma del Estado de México, 1997.
- [41] NACHTIGALL, K., «Periodic network optimization with different arc frequencies», *Discrete Applied Mathematics*, **69**(1–2), págs. 1–17, 1996.
- [42] NACHTIGALL, K. y VOGET, S., «A genetic algorithm approach to periodic railway synchronization», *Computers and amp. Operations Research*, **23**(5), págs. 453–463, 1996.
- [43] ODIJK, M. A., «A constraint generation algorithm for the construction of periodic railway timetables», *Transportation Research Part B: Methodological*, **30**(6), págs. 455–464, 1996.
- [44] OSMAN, I. y LAPORTE, G., «Metaheuristics: A bibliography», *Annals of Operations Research*, **63**, págs. 513–623, 1996.
- [45] ROY, B., *Multicriteria methodology for decision aiding*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1996.
- [46] SCHOBEL, A. y SCHOLL, S., «Line Planning with Minimal Traveling Time», 5th Workshop on Algorithmic Methods and Models for Optimization of Railways, 2005.
- [47] STEUER, R., *Multiple criteria optimization: Theory, computation and application*, John Wiley, USA, 1986.

- 
- [48] SZETO, W. y WU, Y., «A simultaneous bus route design and frequency setting problem for Tin Shui Wai, Hong Kong», *European Journal of Operational Research*, **209**(2), págs. 141–155, 2011.
- [49] VÉLEZ, M. C. y MONTROYA, J. A., «Metaheurísticos: Una alternativa para la solución de problemas combinatorios en administración de operaciones», *Revista de Escuela de Ingeniería de Antioquía*, **8**, págs. 99–115, 1997.
- [50] VIANA, A. y SOUSADE, J. P., «Using metaheuristics in multiobjective resource constrained project scheduling», *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, **120**, págs. 359–374, 2000.
- [51] WEI, F., *Optimal transit route network design problems: Algorithms, implementations and numerical results*, Tesis Doctoral, University of Texas at Austin, 2004.
- [52] WOLSEY, L. A., *Integer programming*, John Wiley & Sons, USA, 1998.
- [53] YAN, S., CHIN-JEN, C. y CHING-HUI, T., «Inter-city bus routing and timetable setting under stochastic demands», *Transportation research part A*, **40**(1), págs. 572–586, 2006.
- [54] YANG, X.-S., *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*, Luniver Press, 2010.
- [55] YANN, C. y PATRICK, S., *Multiobjective optimization: Principles and case of Studies*, primera edición, Springer, 2003.
- [56] ZHAO, F. y ZENG, X., «Optimization of transit route network, vehicle headways and timetables for large-scale transit networks», *European Journal of Operational Research*, **186**(2), págs. 841–855, 2008.

# FICHA AUTOBIOGRÁFICA

---

Paulina Alejandra Ávila Torres

Candidato para el grado de Maestro en Ingeniería  
con especialidad en Ingeniería de Sistemas

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

UN ENFOQUE INTEGRADO MULTICRITERIO PARA  
LA PLANIFICACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE  
PASO Y LAS TABLAS DE TIEMPO DE UNA  
EMPRESA DE TRANSPORTE URBANO

Soy ingeniera en sistemas computacionales, egresada del Instituto Tecnológico de Nuevo Laredo en el año 2006. En el 2009 participé del verano de investigación científica de la FIME en la Universidad Autónoma de Nuevo León, trabajando en un proyecto de clasificación de inventarios con el Dr. Fernando López Irarragorri. Posteriormente, en el semestre agosto-diciembre 2009 me integré al grupo de investigación del Dr. Fernando López como asistente de investigación, en ese tiempo participé en dos proyectos: Clasificación ABC multicriterio de inventarios y Desarrollo de un DSS para apoyar la toma de decisiones en la planificación de una empresa de transporte urbano. En enero de 2010 ingresé a la maestría en ciencias en ingeniería de sistemas.